APUNTES DE ACÚSTICA EN LA EDIFICACIÓN Y EL URBANISMO (VI)

por

CÉSAR DÍAZ SANCHIDRIÁN



CUADERNOS DEL INSTITUTO JUAN DE HERRERA DE LA *ESCUELA DE ARQUITECTURA* DE *MADRID*

2-51-06

APUNTES DE ACÚSTICA EN LA EDIFICACIÓN Y EL URBANISMO (VI)

por

CÉSAR DÍAZ SANCHIDRIÁN

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

2-51-06

C U A D E R N O S
D E L I N S T I T U T O
J U A N D E H E R R E R A

0 VARIOS
1 ESTRUCTURAS
2 CONSTRUCCIÓN
3 FÍSICA Y MATEMÁTICAS
4 TEORÍA
5 GEOMETRÍA Y DIBUJO
6 PROYECTOS
7 URBANISMO
8 RESTAURACIÓN

NUEVA NUMERACIÓN

2 Área
51 Autor
06 Ordinal de cuaderno (del autor)

Apuntes de acústica en la edificación y el urbanismo (VI)

Instituto Juan de Herrera.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
Composición y maquetación: Daniel Álvarez Morcillo.
CUADERNO 1340.01 / 2-51-06
ISBN: 84-9728-021-0 (obra completa)
ISBN: 84-9728-038-5 (Apuntes VI)
Depósito Legal: M-20241-2002

ÍNDICE

13 AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO.

13.1- INTRODUCCIÓN

El aislamiento acústico tiene por objeto el proteger un ambiente acústico contra la penetración de sonidos no deseados, dificultando su propagación. El aislamiento acústico a ruido aéreo de un elemento constructivo o cerramiento que separa dos ambientes acústicos, se define como la capacidad de reducir la energía acústica que se propaga por vía aérea del ambiente acústico emisor al receptor.

Según el medio en el que se produce el ruido, este se clasifica en *ruido aéreo*, cuando se genera en el aire y *ruido estructural*, cuando se genera en un medio sólido. El *ruido de impacto* es un caso particular de ruido estructural.

La transmisión acústica desde el exterior a un recinto de un edificio, entre dos recintos, etc. se produce por diferentes caminos, los directos y los indirectos.

Las transmisiones directas se realizan únicamente a través del elemento separador. Incluyen las transmisiones del sonido que incidiendo sobre el elemento separador es radiado por este al recinto receptor, y el ruido aéreo transmitido a través de huecos y rendijas en el mismo. Las transmisiones directas dependen básicamente del aislamiento acústico del elemento separador y de su superficie.

Las transmisiones indirectas, las que no son directas, se subdividen en *indirectas por vía sólida o transmisiones por flancos*, (paredes, techos, suelos) e *indirectas por vía aérea* (corredores, techos suspendidos, sistemas de ventilación, etc.). Las transmisiones indirectas dependen de la constitución de las paredes laterales y del tipo de ligazón con el elemento separador.

Al estudiar los caminos de transmisión del sonido entre dos recintos contiguos, en general, se suelen considerar nueve caminos de propagación, uno directo y ocho indirectos, dos por cada uno de los cuatro elementos de flanco.

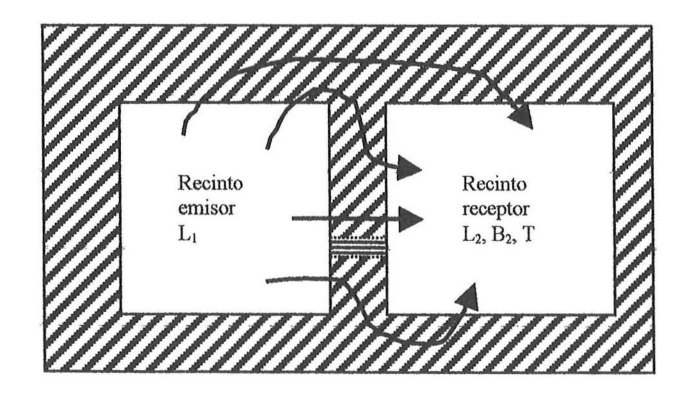


Figura 13.1: Caminos de transmisión acústica entre dos recintos.

Para controlar el ruido se puede actuar, según el tipo de problema, sobre las fuentes de ruido, el espacio donde se produce, las vías de transmisión, el recinto receptor y sobre las personas o elementos receptores del sonido.

A lo largo de los años se han realizado en diversos países encuestas a poblaciones expuestas a una serie de ruidos objetivos, que interferían de forma directa o indirecta con la comunicación, concentración en el trabajo, descanso, desarrollo de una actividad, pérdida auditiva, etc. De las respuestas de las personas con los valores del ruido, se han elaborado una serie de criterios, con la finalidad de determinar que niveles de ruidos son aceptables o no, según el lugar, hora y actividad. Básicamente podemos subdividirlos en tres tipos: exposición de la comunidad al ruido urbano, exposición al ruido ocupacional y de calidad acústica interior o en espacios cerrados.

Los criterios de calidad acústica en recintos cerrados pueden utilizarse como objetivo a conseguir en el diseño del mismo, o como valores máximos del ruido de fondo para el desarrollo de una actividad determinada en él.

La mayoría de los criterios de valoración del ruido nos muestran una evaluación del mismo mediante unos índices, expresados mediante curvas de valoración, que permiten asignar al espectro en frecuencias de un ruido, medido en bandas de octava, un solo número correspondiente a la curva que queda por encima del espectro del ruido analizado. Las más habituales son las NC, NR, RC y NCB.

Los edificios desde el punto de vista acústico tienen que cumplir unas condiciones acústicas mínimas exigibles, de acuerdo con su uso y la actividad que se desarrolle en su interior. Los edificios deben quedar caracterizados acústicamente por los índices de aislamiento acústico que en cada caso se definan, entre todos y cada uno de los espacios interiores habitables. Las instalaciones se caracterizarán por los índices de de ruido y vibraciones que produzcan en las zonas del edificio bajo su influencia.

La realización de un buen proyecto acústico del edificio es una condición necesaria para garantizar la consecución de unos niveles exigenciales mínimos. El fabricante de los materiales y equipamiento debe proporcionar los valores de los parámetros acústicos representativos de los mismos. La caracterización acústica debe ser realizada conforme a las normas de medición adecuadas y por unos laboratorios acreditados. Todo lo anterior debe ir acompañado de una correcta realización de la obra. Es imprescindible el incluir un control de calidad acústica de los edificios terminados como garantia para el usuario.

Desde la perspectiva de la acústica, una vez elegido el sistema constructivo y admitida una realización adecuada del mismo, las características acústicas del edificio dependen de la adecuada elección de los materiales.

En los edificios las transmisiones indirectas son importantes, y en algunos casos pueden ser predominantes. La transmisión indirecta es tanto mayor cuanto más ligeros son los elementos constructivos adyacentes.

El hueco de la fachada es un elemento complejo del edificio tradicional. El cerramiento del hueco se debe realizar con ventanas o balconeras de calidad. En la actualidad se dispone de excelentes acristalamientos acústicos que deben ir acompañados de

carpinterias de igual calidad. La utilización de ventanas con hojas de practicabilidad corredera disminuye de forma importante el aislamiento al ruido aéreo de las fachadas. Las persianas enrrollables de cajón y cinta, debido a la forma habitual de colocar el cajón de persiana hacia el interior, con una tapa de registro ligera y generalmente con poca estanqueidad disminuyen de forma importante el aislamiento a ruido aéreo de las fachadas.

13.2.- MAGNITUDES QUE EXPRESAN EL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO.

Cuando las ondas sonoras inciden sobre un elemento constructivo, este vibra y transmite energía acústica de la misma frecuencia que el sonido incidente. La energía trasmitida por el elemento constructivo depende de la energía incidente y de las características del elemento. Dicho de otra forma, cuando las ondas sonoras inciden sobre el elemento constructivo con una energía E_i , parte de la energía es reflejada E_r , y el resto es absorbida E_a . La energía absorbida es en parte disipada en el elemento constructivo y el resto es transmitida.

$$E_i = E_r + E_a = E_r + E_d + E_t \qquad [13.1]$$

Se define el *coeficiente de transmisión sonora de un elemento constructivo* τ al cociente entre las potencia acústica transmitida a través del elemento y la potencia acústica incidente sobre el.

$$\tau(\theta) = \frac{W_{transmitida}}{W_{incidente}} \qquad [13.2]$$

El coeficiente de transmisión sonora es función del ángulo de incidencia θ, medido respecto a la normal a la superficie del elemento divisorio.

13.2.1 MAGNITUDES QUE EXPRESAN LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

Las magnitudes que caracterizan las propiedades de aislamiento a ruido aéreo de un elemento constructivo se determinan en bandas de tercio de octava y de octava.

Índice de reducción acústica, R

Es diez veces el logaritmo decimal del cociente entre la potencia acústica W_1 incidente sobre la pared de ensayo y la potencia acústica transmitida a través de la muestra. Esta magnitud se designa por R y se expresa en decibelios.

$$R = 10.\log\frac{1}{\tau} = 10.\lg\frac{W_1}{W_2} \quad dB \qquad [13.3]$$

En los países de habla inglesa, el índice de reducción sonora R, se suele denominar, *perdidas por transmisión sonora*, TL.

Considerando que los campos acústicos en los dos recintos son perfectamente difusos y que el sonido radiado al local receptor se ha transmitido a través de la muestra, se puede

probar de acuerdo con la Norma UNE-EN-ISO 140-3: Medición en laboratorio del aislamiento acústico al ruido aéreo de los elementos de construcción, el índice de reducción sonora R se evalúa como

$$R = L_1 - L_2 + 10\lg\frac{S}{A} \quad dB \qquad [13.4]$$

donde: L_1 y L_2 son los niveles de presión acústica medios en los recintos emisor y receptor, expresados en dB; S, es el área de la muestra, en m^2; y A es el área de absorción acústica equivalente en el recinto receptor, en m^2.

El término de corrección de la ecuación anterior, se evalúa a partir del tiempo de reverberación medido de acuerdo con la Norma EN-ISO 354 y se determina utilizando la fórmula de Sabine del tiempo de reverberación:

$$A = \frac{0{,}16V}{T} \quad m^2 \qquad [13.5]$$

donde: A, es el área de absorción acústica equivalente, en m^2; V es el volumen del recinto en m^3 y T es el tiempo de reverberación del recinto receptor en segundos.

13.2.2 MAGNITUDES QUE EXPRESAN LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS RECINTOS.

De acuerdo con la Norma UNE-EN-ISO 140-4: Medición *in situ* del aislamiento al ruido aéreo entre locales, se define:

Diferencia de niveles, D
Es la diferencia, en decibelios, del promedio espacio-temporal de los niveles de presión acústica producidos en los dos recintos para una o varias fuentes de ruido situadas en ellos:

$$D = L_1 - L_2 \quad dB \qquad [13.6]$$

L_1 es el nivel de presión acústica medio en el recinto emisor; L_2, es el nivel de presión acústica medio en el recinto receptor. En general, si intercambiamos los recintos emisor y receptor D no es el mismo.

Diferencia de niveles normalizada, D_n
Es la diferencia de niveles, en decibelios, correspondiente a un área de absorción de referencia en el recinto receptor:

$$D_n = D - 10\log\frac{A}{A_0} \quad dB \qquad [13.7]$$

D, es la diferencia de niveles; A es el área de absorción acústica equivalente del recinto receptor, en m^2; A_0, es el área de absorción acústica de referencia, en m^2, (para recintos en viviendas o recintos de tamaño comparable: $A_0 = 10\ m^2$).

Diferencia de niveles estandarizada, D_{nT}
Es la diferencia de niveles, en decibelios, correspondiente a un valor de referencia del tiempo de reverberación en el recinto receptor, se define mediante la expresión:

$$D_{nT} = D + 10\lg\frac{T}{T_0} \quad dB \qquad [13.8]$$

D es la diferencia de niveles,; T es el tiempo de reverberación en el recinto receptor y T_0 es el tiempo de reverberación de referencia a todas las frecuencias; para viviendas, T_0 = 0,5 s.

La diferencia de niveles D; la diferencia de niveles normalizada D_n; y la diferencia de niveles estandarizada D_{nT}, en general, varían con la frecuencia del sonido.

Índice de reducción acústica aparente, R'

Es diez veces el logaritmo decimal del cociente entre la potencia acústica W_1 incidente sobre la pared de ensayo y la potencia acústica total transmitida al recinto receptor si, además de la potencia sonora W_2 transmitida a través del elemento separador, es significativa la potencia sonora W_3 transmitida a través de elementos laterales o de otros componentes; se expresa en decibelios:

$$R' = 10.\lg\frac{W_1}{W_2 + W_3} \quad dB \qquad [13.9]$$

En los países de habla inglesa, el índice de reducción acústica aparente R', se denomina *perdida por transmisión acústica aparente.*

Supuestos los campos acústicos difusos en los recintos emisor y receptor, el índice de reducción sonora aparente R', se evalúa como

$$R' = D + 10\lg\frac{S}{A} \quad dB \qquad [13.10]$$

donde: D es la diferencia de niveles; S es el área del elemento separador; y A es el área de absorción acústica equivalente en el recinto receptor.

En el caso de determinar la reducción sonora de una puerta, S es el área de la abertura en la cual está montada la puerta, incluido su bastidor. Se debe demostrar que la transmisión sonora a través de las otras partes del muro soporte es despreciable.

En el índice de reducción sonora aparente, la potencia sonora transmitida al recinto receptor está relacionada con la potencia sonora incidente sobre elemento constructivo común, con independencia de las condiciones reales de transmisión.

Si los dos recintos tienen el mismo área de absorción acústica equivalente, el índice de reducción acústica aparente es independiente del sentido de la transmisión. Si las áreas de absorción acústica equivalentes son diferentes, el índice de reducción acústica aparente es diferente según quien sea el recinto emisor o receptor. La misma fuente sonora emitiendo con el mismo nivel de potencia acústica se percibe de forma diferente según se encuentre situada en uno u otro recinto.

Relación entre los diversos índices

Las diferencias de niveles normalizada y estandarizada están relacionadas con el índice de reducción sonora aparente. En consecuencia al conocer una de las magnitudes anteriores se pueden deducir las otras. Se relacionan de la siguiente manera:

$$D_n = R'+10.\lg\frac{A_0}{S} = R'+10.\lg\frac{10}{S} \quad dB \qquad [13.11]$$

$$D_{nT} = R'+10.\lg\frac{0{,}16V}{T_0 S} = R'+10.\lg\frac{0{,}32V}{S} \quad dB \qquad [13.12]$$

V es el volumen del recinto receptor, en m^3.

En las mediciones in situ del aislamiento global a ruido aéreo de fachadas se obtiene el índice de reducción acústica de una fachada en relación a una posición 2 m frente a la fachada. Los métodos globales, pretenden valorar la diferencia de nivel sonoro exterior/interior en las condiciones de tráfico existentes. Los métodos globales más precisos usan el ruido de tráfico como fuente de ruido. Adicionalmente se puede usar un altavoz como fuente sonora artificial. Según la Norma EN ISO 140-5: Mediciónes in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachada y de fachadas, se utilizan las magnitudes siguientes:

Diferencia de niveles, D_{2m}

Es la diferencia, en decibelios, entre el nivel de presión sonora exterior a 2 m frente a la fachada, $L_{1,2m}$ y el valor medio espacio-temporal del nivel de presión sonora L_2, en el interior del local receptor:

$$D_{2m} = L_{1,2m} - L_2 \quad dB \qquad [13.13]$$

Nota: Si se usa el ruido de tráfico como fuente sonora, la notación debe ser D_{tr},2m. Si se usa un altavoz la notación debe ser $L_{ls,2m}$

Diferencia de niveles normalizada, $D_{2m,n}$

Es la diferencia de niveles, en decibelios, correspondiente a un área de absorción de referencia en el recinto receptor:

$$D_{2m,n} = D_{2m} - 10\log\frac{A}{A_0} \quad dB \qquad [13.14]$$

en esta expresión: D_{2m} , es la diferencia de niveles; A es el área de absorción acústica equivalente del recinto receptor, en $m^{2;}$; A_0, = 10 m^2 es el área de absorción acústica equivalente de referencia.

Nota: Si se usa el ruido de tráfico como fuente sonora, la notación debe ser $D_{tr,2m,n}$. Si se usa un altavoz la notación debe ser $D_{ls,2m,n}$

Diferencia de niveles estandarizada, $D_{2m,nT}$

Es la diferencia de niveles, en decibelios, correspondiente a un valor de referencia del tiempo de reverberación en el recinto receptor, se define mediante la expresión:

$$D_{2m,nT} = D_{2m} + 10\lg\frac{T}{T_0} \quad dB \qquad [13.15]$$

D_{2m} es la diferencia de niveles,; T es el tiempo de reverberación en el recinto receptor y T_0 es el tiempo de reverberación de referencia; T_0 = 0,5 s.

Nota: **Si** se usa el ruido de tráfico como fuente sonora, la notación debe ser $D_{tr,2m,nT}$. Si se usa un altavoz la notación debe ser $D_{ls,2m,nT}$

MÉTODO	RESULTADO	CAMPO DE APLICACIÓN
Global con ruido de tráfico	$D_{tr, 2m, nT}$ $D_{tr,2m,n}$	Método preferido para valorar el índice de reducción sonora de una fachada expuesta al ruido de tráfico.
Global con ruido de trenes	$D_{rt, 2m, nT}$ $D_{rt, 2m,n}$	Método preferido para valorar el ïndice de reducción sonora de una fachada expuesta al ruido de trenes.
Global con ruido de aeronaves	$D_{at,2m,nT}$ $D_{at,2m,n}$	Método preferido para valorar el índice de reducción sonora de una fachada expuesta al ruido de aeronaves.
Global con altavoz	$D_{ls, 2m,nT}$ $D_{ls, 2m,n}$	Método alternativo a los tres anteriores.

Tabla 1: Métodos de medición global del aislamiento a ruido aéreo de fachadas.

Debido a su uso, conviene recordar la definición del nivel medio de presión acústica en un local;

Nivel medio de presión acústica en un recinto, L_2.

Es diez veces el logaritmo decimal del cociente entre el promedio espacio-temporal de los cuadrados de las presiones sonoras y el cuadrado de la presión sonora de referencia, tomándose el promedio espacial en todo el recinto, con excepción de las zonas en las que la radiación directa de la fuente o el campo próximo de las paredes, el techo, etc., tienen una influencia significativa, se expresa en decibelios.

$$L_2 = 10.\log\left(\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} 10^{0,1L_j}\right) \ dB \qquad [13.16]$$

donde L_j son los niveles de presión sonora L_1 a L_n en n posiciones diferentes dentro del recinto.

A veces se suelen expresar los resultados del aislamiento acústico en bandas de octava, calculados a partir de los resultados en tercio de octava. La forma de realizarlo es la siguiente: en cada banda de octava se usan los tres tercios de octava comprendidos en la misma, mediante la expresión

$$X_{oct} = -10\log\left(\sum_{n=1}^{3}\frac{10^{-0,1X_{1/3oct}}}{3}\right) \qquad [13.17]$$

donde X es la magnitud utilizada.

13.3.- INDICES GLOBALES DE VALORACIÓN DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO.

Al ser el aislamiento acústico de un elemento constructivo función de la frecuencia, hay que suministrar un gran número de datos; para simplificar el proceso de cálculo se han realizado estudios con fuentes de ruidos típicas en viviendas para obtener índices de valoración globales, que especifican de forma efectiva las características de aislamiento acústico de una partición y simplifican de forma importante el establecimiento de valores exigenciales en las normativas. Estos índices globales tienen en cuenta las características físicas del ruido y aspectos perceptivos, básicamente de la molestia que producen. Se utilizan en el estudio del aislamiento acústico de ruidos aéreos y de ruidos de impactos.

Los métodos más utilizados para incluir un índice global de valoración del aislamiento acústico a ruido aéreo son los siguientes:

13.3.1.- **Aislamiento acústico global a ruido aéreo de un elemento constructivo en dB ponderados A.**

La expresión del índice global del aislamiento acústico en decibelios A es la siguiente:

$$R_A = 10.\lg \frac{\sum_i 10^{0,1(L_i+A_i)}}{\sum_i 10^{0,1(L_i-R_i+A_i)}} dB, i = 1,2,...,n \qquad [13.18]$$

donde en cada banda de frecuencia i, L_i, es el nivel del ruido rosa; R_i , aislamiento acústico a ruido aéreo normalizado según la UNE EN ISO 140 y A_i la ponderación A

Según la NBE-CA-88, es la diferencia de niveles de intensidad acústica en la emisión y en la recepción, ambos ponderados A, *considerando que el ruido en la emisión es rosa.* Puede obtenerse experimentalmente cumpliendo los respectivos requisitos o bien deducirse del aislamiento acústico normalizado R.

La NBE-CA-88 permite el uso del dB ponderado A, dB(A), y en función de él establece unos niveles exigenciales. El margen de frecuencias de aplicación de la norma está entre 100 Hz y 5000 Hz, en bandas de tercio de octava. Cuando se conocen los valores del aislamiento acústico normalizado R_i, se puede calcular el aislamiento en dB(A) mediante la siguiente expresión:

$$R_A = 11 - 10.\log\left(\sum_{i=100}^{i=5000} 10^{0,1(A_i-R_i)}\right) \text{ dB} \qquad [13.19]$$

A_i son los valores de la ponderación A en cada banda de 1/3 de octava.

13.3.2 - Índices de Aislamiento Acústico que utilizan una curva de referencia:

Son los métodos más difundidos, se basan en la comparación de una curva de aislamiento obtenida con curva tipo, siguiendo un determinado procedimiento. Mediante este se consigue que la dependencia frecuencial del aislamiento a ruido aéreo se transforma en un único número

13.3.2.1.- Magnitudes globales de las propiedades de aislamiento a ruido aéreo de elementos de construcción y en edificios, según la UNE-EN ISO 717-1. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento al ruido aéreo.

Los métodos de medición del aislamiento al ruido aéreo de elementos de construcción y en edificios han sido normalizados en las Normas Internacionales ISO 140 partes 3,4,5,9 y 10. La ISO 717 tiene por objetivo normalizar un método por el cual la dependencia en función de la frecuencia del aislamiento a ruido aéreo pueda convertirse en un solo número que caracterice el aislamiento acústico y simplificar la formulación de los requisitos acústicos en los códigos de la edificación.

Para la aplicación de la ISO 717, se utilizan diferentes definiciones como las siguientes:

- **Magnitud global para la valoración del aislamiento al ruido aéreo**: Es el valor en dB, a 500 Hz de la curva de referencia una vez ajustada a los valores experimentales según el método especificado en esta parte de la ISO 717. Existen magnitudes globales de las propiedades globales de aislamiento al ruido aéreo de elementos de construcción, como por ejemplo el índice ponderado de reducción sonora R_w y magnitudes globales del aislamiento al ruido aéreo en edificios tales como: índice ponderado de reducción sonora aparente R'_w, Diferencia de nivel normalizada ponderada $D_{n,w}$, Diferencia de nivel estandarizada ponderada $D_{nT,w}$.

- **Término de adaptación al espectro**: Es el valor, en dB, que ha de añadirse al valor de la magnitud global para tener en cuenta las características de un espectro de ruido particular.

Por ejemplo, es habitual utilizar para caracterizar el comportamiento acústico de un elemento constructivo en laboratorio el índice global R_w (C; C_{tr}), donde

- R_w es el índice ponderado de reducción sonora, en dB.
- C, Término de corrección para ruido rosa ponderado A. Se utiliza en el caso de fuentes de ruido con pocas bajas frecuencias, por ejemplo: actividades humanas (conversación, música, radio, televisión, juegos de niños), trenes a velocidades medias y altas, autopistas a velocidades mayores de 80 km/h, aviones a reacción a distancias cortas, factorías que emiten ruido de frecuencias medias y altas.
- C_{tr}, Termino de corrección para ruido de tráfico urbano ponderado A, se utiliza en el caso de fuentes de ruido con predominio de bajas frecuencias, por ejemplo: Tráfico urbano, trenes a velocidades bajas, aviones a propulsión, aviones a reacción a grandes distancias, música de discotecas, factorías que emiten ruido en frecuencias bajas y medias.

Cuanto más elevados sean R_w, R_w +C, R_w +C_{tr}, mayor será el aislamiento acústico a ruido aéreo del elemento constructivo. Por ejemplo: R_W (C, C_{tr}) = 38(-4, -8) dB, significa que R_w que el índice ponderado de reducción sonora es 38 dB, que con ruido rosa ponderado a se reduce en 4 dB, y con tráfico se reduce en 8 dB.

El procedimiento para la evaluación de magnitudes globales es el mismo para todas ellas y lo utilizaremos por ejemplo en el caso del índice ponderado de reducción sonora, R_w en dB.

- Índice ponderado de reducción sonora R_w

Es un índice de un solo número que define magnitudes globales para el aislamiento al ruido aéreo en edificios y de elementos de construcción tales como paredes, suelos, puertas y ventanas; toma en consideración los diferentes espectros sonoros de la fuente de ruido (término de adaptación al espectro) y proporciona reglas para la determinación de estas magnitudes a partir de los resultados de medición realizados en bandas de tercio de octava o de octava de acuerdo con las Normas Internacionales ISO 140. La norma UNE-EN ISO 717-1 de diciembre de 1996, que adopta íntegramente la Norma Internacional ISO 717-1:1996, normaliza un método por el cual la dependencia con la frecuencia del aislamiento al ruido aéreo, puede convertirse en un solo número, a partir de los valores medidos del índice de reducción sonora, R.

Para valorar los resultados conforme a las Normas ISO 140 en bandas de un tercio de octava o de octava, con precisión de 0,1 dB, se desplaza la curva de referencia, Tabla 13.2, en saltos de 1 dB hacia la curva medida hasta que la suma de las desviaciones desfavorables sea lo mayor posible pero no mayor de 32 dB, para mediciones en 16 bandas de tercio de octava, o 10 dB, para mediciones en 5 bandas de octava. Se produce una desviación desfavorable en una determinada banda de frecuencia cuando el resultado de las mediciones es inferior al valor de referencia. Únicamente se consideran las desviaciones desfavorables.

El valor, en dB, de la curva de referencia en la banda de 500 Hz, después del desplazamiento, de acuerdo con el procedimiento anterior es el valor de R_w. El rango de frecuencias de la curva de referencia y de la de medición está entre 100 y 3150 Hz en bandas de tercio de octava y de 125 a 2000 Hz para bandas de octava. El rango de frecuencias puede ampliarse entre 50 y 5000 Hz.

Frecuencia, Hz	Valores de referencia, dB	
	Bandas de tercio de octava	Bandas de octava
100	33	
125	36	36
160	39	
200	42	
250	45	45
315	48	
400	51	
500	52	52
630	53	
800	54	
1000	55	55
1250	56	
1600	56	
2000	56	56
2500	56	
3150	56	

Tabla 13.2: Valores de referencia para aislamientos a ruido aéreo:

En la figura 13.2 se representan los valores de la curva de referencia usados para comparar con los resultados de la medición, para aislamiento al ruido aéreo, en bandas de tercio de octava.

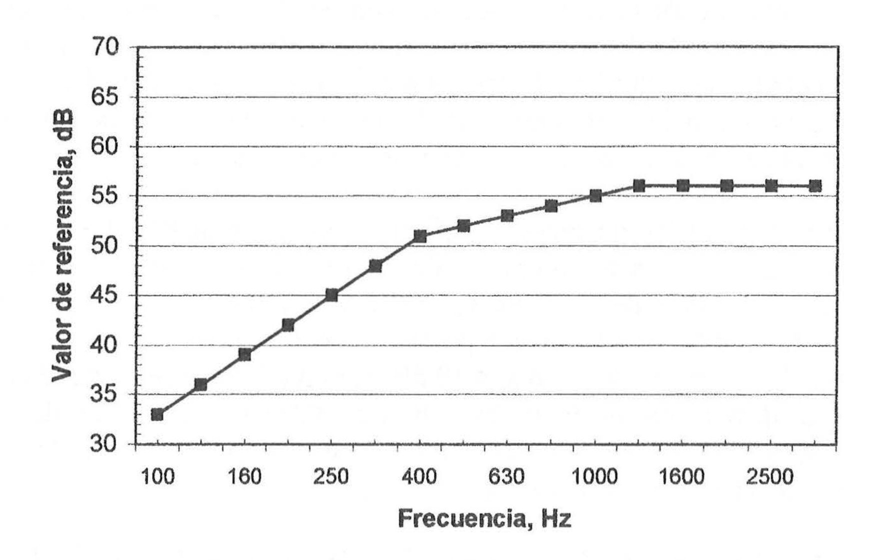


Figura 13.2: Valores de la curva de referencia en tercios de octava.

- Cálculo de los términos de adaptación espectral

Los términos de adaptación espectral, C_j, deben calcularse con los espectros sonoros dados en la Tabla 13.3, mediante la ecuación:

$$C_j = X_{Aj} - X_w \text{ dB} \qquad [13.20]$$

donde

j, es el índice de los espectros sonoros C, C_{tr}

X_w , es el valor del índice global calculado a partir de R, R', D_n, D_{nT}

X_{Aj} se calcula a partir de la expresión

$$X_{Aji} = -10 \log \sum 10^{0,1(L_{ij} - X_i)} \quad dB \qquad [13.21]$$

donde

i es el índice para las bandas de tercio de octava, o para las bandas de octava.

L_{ij} son los niveles a la frecuencia i para el espectro j

X_i es R_i , o R'_i , o $D_{n,i}$, o $D_{nT,i}$, a la frecuencia de medida i dada con la precisión de 0,1 dB.

Se calcula el término de adaptación espectral con precisión de 0,1 dB y se redondea al número entero más próximo.

Frecuencia, Hz	Niveles sonoros L_{ij}, dB			
	Espectro para calcular C		Espectro para calcular C_{tr}	
	Tercio de octava	Octava	Tercio de octava	Octava
100	-29		-20	
125	-26	-21	-20	-14
160	-23		-18	
200	-21		-16	
250	-19	-14	-15	-10
315	-17		-14	
400	-15		-13	
500	-13	-8	-12	-7
630	-12		-11	
800	-11		-9	
1000	-10	-5	-8	-4
1250	-9		-9	
1600	-9		-10	
2000	-9	-4	-11	-6
2500	-9		-13	
3150	-9		-15	

Nota: Todos los niveles están ponderados A y el nivel global de espectro normalizado a 0 dB.

Tabla 13.3: Espectros de nivel sonoro para calcular los términos de adaptación del espectro.

Para las mediciones in situ de acuerdo con las Normas ISO 140-4 o 5, se debe indicar si los resultados globales se expresan en octavas o tercios de octava. Es habitual encontrar diferencias de ± 1 dB.

El aislamiento acústico global en dB ponderados A es equivalente a $R_w + C_{100\text{-}5000}$ de la ISO 717-1.

$$R_A = R_w + C_{100\text{-}5000}$$

Por otra parte se halla eempiricamente que para divisorios simples de una hoja

$$R_w = R_A + 1 \text{ dB}$$

13.3.2.2.- **Índice de Clase de Transmisión Sonora**

La sociedad estadounidense para ensayo de materiales (ASTME) ha especificado un procedimiento conocido por Clase de Transmisión Sonora (STC). Se obtiene a partir de la comparación de la curva de las perdidas de transmisión con una curva de referencia. Las medidas se realizan en las 16 bandas de tercio de octava centradas entre 125 y 4000 Hz. Para el ajuste se deben de cumplir unos requisitos sobre las máximas desviaciones respecto a la curva de referencia. Ningún valor individual de las pérdidas por transmisión debe ser menor en más de 8 dB por debajo de la curva de referencia y la suma de las desviaciones desfavorables no debe ser superior a 32. Este procedimiento es el habitual en Estados Unidos. Cuando las mediciones acústicas se realizan en edificios el índice se denomina Clase de Transmisión Sonora de Campo, (FSTC).

13.4.- AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO DE PARTICIONES SIMPLES ISOTRÓPICAS DE UNA HOJA.

El índice de reducción acústica a ruido aéreo de un elemento constructivo R, es función de varios factores. Los parámetros físicos que tienen mayor influencia en el aislamiento al ruido aéreo de una partición simple de una hoja son: la masa, la rigidez de la partición, las resonancias, los efectos de coincidencia, la frecuencia de las ondas acústicas y su ángulo de incidencia con la partición. En acústica de los edificios las frecuencias de interés están entre 100 y 5000 Hz.

En las particiones simples de una hoja pueden distinguirse en general cuatro zonas del dominio de frecuencias comprendidas entre la frecuencia natural de la partición en el vacío f_0 y la frecuencia crítica f_c. En la figura 13.3 se muestran de forma aproximada y resaltando las diferentes zonas, el índice de reducción acústica al ruido aéreo en función de la frecuencia.

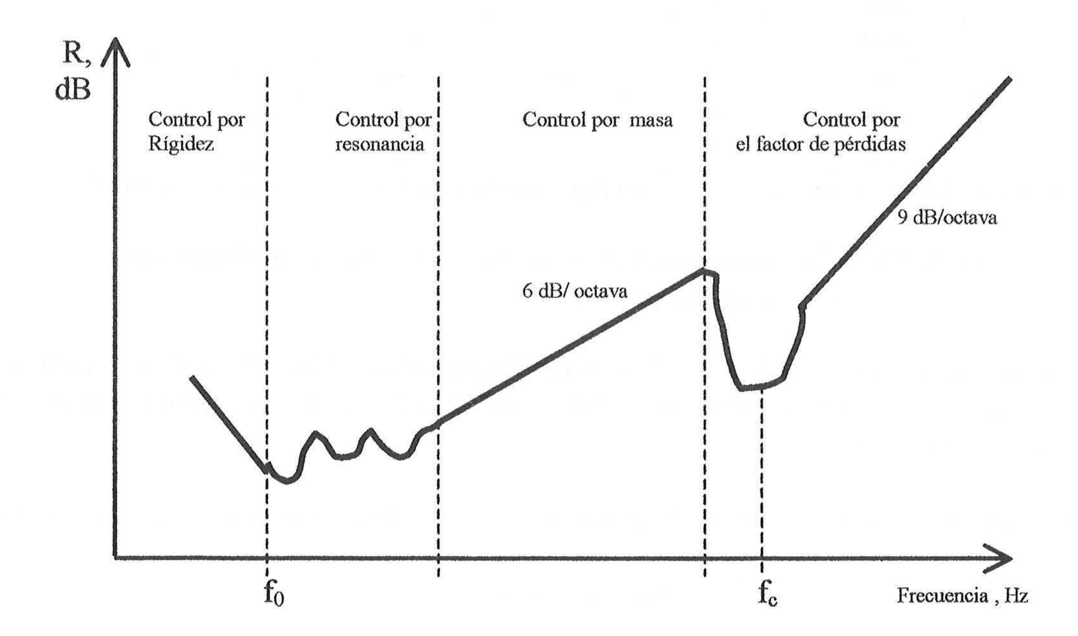


Figura 13.3: Índice de reducción acústica de una partición simple de una hoja.

1) *Zona controlada por la rigidez.*

A muy bajas frecuencias el aislamiento al ruido aéreo está controlado básicamente por la rigidez de la partición. Se cumple que cuanto mayor es la rigidez, menor es el aislamiento al ruido aéreo.

La frecuencia natural de una pared homogénea ilimitada se calcula mediante la expresión:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{s}{m'}}\ Hz \qquad [13.22]$$

donde: s es la rigidez de la pared por unidad de superficie y m′ es la masa de la pared por unidad de superficie. En esta zona el índice de aislamiento acústico a ruido aéreo se obtiene mediante la expresión:

$$f < f_0 \qquad R = 20.\log s - 20 \log f - 20.\log(4\pi\rho c) \qquad dB \qquad [13.23]$$

El aislamiento acústico a ruido aéreo está determinado principalmente por la rigidez del montaje y decrece 6 dB/octava con el aumento de la frecuencia. Si la hoja es muy ligera, por ejemplo una lámina delgada de plástico, la expresión anterior no es válida.

2) Zona controlada por resonancia

La partición tiene numerosos modos propios de vibración correspondientes a las frecuencias de resonancia. Estas dependen de las dimensiones, de la rigidez y de la masa por unidad de superficie de la partición. Las frecuencias de resonancia de una partición simple finita se pueden calcular mediante la expresión:

$$f_{p,q} = k.h\sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}\left[\left(\frac{p}{a}\right)^2 + \left(\frac{q}{b}\right)^2\right] \quad Hz \qquad [13.24]$$

donde: p,q = 1,2,3,...; a,b son las dimensiones de la partición; ν es el coeficiente de Poisson, en la mayoría de los casos prácticos su valor es 1/3, k es un coeficiente numérico que depende del modo de fijación de los bordes de la partición. Su valor es: k = 0,43 para bordes soportados; k = 0,86 para bordes encastrados. Predomina la frecuencia de resonancia f_{11}, los valores grandes de a y b reducen f_{11}. Por ejemplo para una hoja de vidrio con bordes encastrados, de dimensiones 1x1,5 m y 5 mm de espesor, f_{11} = 28 Hz.

3) *Zona controlada por la masa*

A partir de valores de la frecuencia superiores al doble de la frecuencia de resonancia f_{11} e inferiores a la frecuencia crítica, el aislamiento al ruido aéreo está controlado por la masa y la frecuencia, de acuerdo con las siguientes expresiones:

3.1) *Ley de masa a incidencia normal*

Se puede demostrar en teoría que la ley de masa a incidencia normal de particiones ilimitadas es

$$R_{\theta=0} = 10\log\left[1 + \left(\frac{\pi f m'}{\rho c}\right)^2\right] \quad dB \qquad [13.25]$$

generalmente $(\pi f m')^2 \rangle\rangle (\rho c)^2$
luego

$$R(\theta = 0) \approx 20.\lg(m'f) - 43 \quad dB \qquad [13.26]$$

El aislamiento acústico a ruido aéreo aumenta 6 dB cada vez que se duplica la masa o la frecuencia. Para aislar un ruido es necesario utilizar materiales de alta densidad superficial m′. Las altas frecuencias se aíslan mejor que las bajas.

La expresión anterior se obtiene en teoría en el caso de ondas planas longitudinales con incidencia perpendicular sobre la partición, esta no tiene rigidez, y no se disipa energía en la partición ni en el fluido que la rodea.

3.2) *Ley de masa a incidencia aleatoria*

Si se tiene en consideración el ángulo de incidencia θ de las ondas sobre la partición, se obtiene

$$R_\theta = 10\log\frac{1}{\tau_\theta} = 10\log\left[1+\left(\frac{\pi f m' \cos\theta}{\rho c}\right)^2\right] \text{ dB} \qquad [13.27]$$

Si en un recinto se considera que el campo acústico incide de forma aleatoria sobre una partición, en este caso se puede considerar un coeficiente de transmisión promedio, considerando todos los ángulos de incidencia entre 0° y 90°, para esta situación se deduce

$$R_{aleatorio} \cong R(0) - 10\lg[0{,}23R(0)] \quad dB \qquad [13.28]$$

3.3) *Ley de masa a incidencia de campo*

En la práctica es más aproximada a la realidad la expresión del índice de aislamiento a ruido aéreo con ángulos de incidencia de 0° a 78°, incidencia de campo, que viene dado por la expresión:

$$R_{campo} = R(0) - 5 \approx 20\lg(m' f) - 48 \quad dB \qquad [13.29]$$

4) *Zona controlada por la coincidencia*

Las expresiones anteriores del índice de reducción acústica R, no tienen en consideración las vibraciones de flexión de la partición. A partir de una determinada frecuencia llamada crítica, hay una disminución importante del aislamiento al ruido aéreo debido al fenómeno de coincidencia.

En el aire, el sonido se propaga mediante ondas longitudinales y su velocidad es la misma para todas las frecuencias. Cuando en un sólido se produce una deformación forzada localizada, se originan ondas libres que se propagan por todo el sólido. Si la partición de una hoja es lo suficientemente delgada, se producen ondas de flexión, que al contrario que otros tipos de ondas, se propagan con una velocidad función de la frecuencia. Existirá una frecuencia llamada crítica, a partir de la cual habrá un ángulo de incidencia, en el que se cumpla que la traza de la longitud de onda del sonido en el aire, coincida con la longitud de la onda de flexión. Esta condición se conoce como efecto de coincidencia, (coincidence effect o trace-matching). *La frecuencia crítica de coincidencia se define como la menor frecuencia a la que se produce el efecto de coincidencia* y corresponde a un ángulo de incidencia de 90°.

Los elementos de la partición son solicitados por dos ondas, la onda aérea incidente, (forzada), y la onda de flexión, (libre). La traza de la onda aérea avanza por la partición con una velocidad c/senθ y la onda de flexión con una velocidad c_f. Cuando las dos velocidades a lo largo de la partición son iguales, los efectos se acumulan y existe una gran radiación de energía por la partición. La pérdida de aislamiento a ruido aéreo es importante en un intervalo de frecuencia, algo por encima de la frecuencia de

coincidencia. La disminución del aislamiento al ruido aéreo, será mayor o menor, en función del valor del factor de pérdidas internas de cada material, η.

$$\lambda_f = \frac{\lambda}{sen\theta} \quad m \qquad [13.30]$$

Si la longitud de onda del sonido en el aire es mayor que la longitud de la onda de flexión en la partición, no puede haber efecto de coincidencia, pues la función seno no puede ser mayor que la unidad.

En el caso de una partición de una hoja homogénea la velocidad de propagación de las ondas de flexión, c_f, viene dada por:

$$c_f = c\sqrt{\frac{f}{f_c}} \quad \frac{m}{s} \qquad [13.31]$$

c es la velocidad del sonido en el aire, f la frecuencia considerada y, f_c es la frecuencia crítica de la partición.

La frecuencia de coincidencia para un ángulo de incidencia se obtiene de la expresión

$$f_{coincidencia,\theta} = \frac{c^2}{2\pi h sen^2\theta}\sqrt{\frac{12\rho(1-\nu^2)}{E}} \quad Hz \qquad [13.32]$$

La frecuencia crítica de la partición se obtiene cuando el ángulo de incidencia es 90° y se obtiene de la fórmula

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi}\sqrt{\frac{m'}{B}} = \frac{c^2}{2\pi h}\sqrt{\frac{12\rho(1-\nu^2)}{E}} = \frac{c^2}{1{,}8c_L h} \quad Hz \qquad [13.33]$$

h, es el espesor de la partición; m′ = ρh, la masa de la partición por unidad de superficie; B, la rigidez dinámica de la partición por unidad de ancho; ρ la densidad del material de la partición; E, el módulo de Young y ν, el coeficiente de Poisson, c_L, la velocidad de las ondas longitudinales en la partición y c la velocidad del sonido en el aire.

5) *Zona de frecuencias superiores a la crítica.*

Se puede demostrar que para frecuencias superiores a la crítica, el índice de aislamiento a ruido aéreo se puede calcular mediante la expresión:

$$f > f_c \qquad R = 20\lg(m' f) + 10\lg\eta + 10\lg(\frac{f}{f_c} - 1) - 44 \quad dB \qquad [13.34]$$

η, es el factor de pérdidas internas de la partición.

El factor de pérdidas interno η, representa la fracción de energía mecánica disipada en forma de energía calorífica intrinsecamente. Las causas pueden ser múltiples, por ejemplo la viscosidad del aire, la radiación acústica de la partición, histéresis mecánica, etc. En la práctica el factor de pérdidas total η_t de una partición tiene en consideración el factor de pérdidas internas, las pérdidas debidas a la radiación de las ondas de flexión libres y las pérdidas de acoplamiento en el perímetro de la partición.

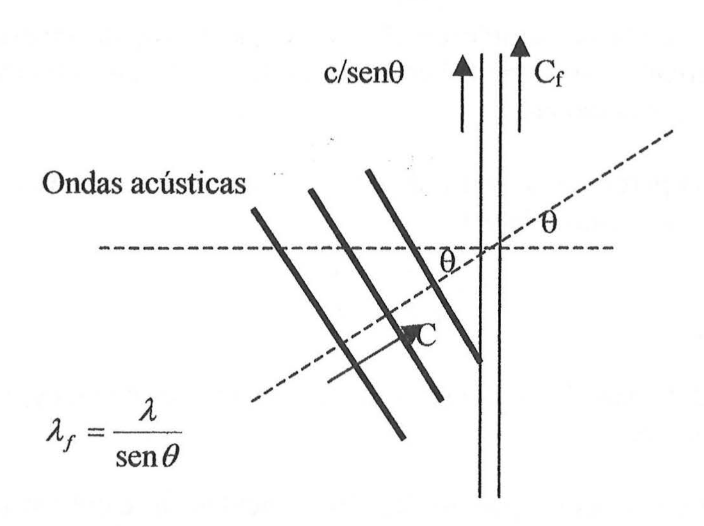


Figura 13.4: Fenómeno de coincidencia

En la Tabla 13.4 se muestran los valores aproximados del producto de la frecuencia crítica y el espesor del material. $f_c.h$ y factor de pérdidas internas de algunos materiales usuales en la construcción.

MATERIAL	Producto de la frecuencia crítica y el espesor del material. $f_c.h$, (m/s).	Factor de pérdidas internas, η
Acero	12,4	$1 - 6.10^{-4}$
Aluminio	12	10^{-4}
Cobre	17,8	2.10^{-3}
Hierro	17,5	$1 - 6.10^{-4}$
Latón	20	$< 10^{-3}$
Plomo	52	$0,5 - 2.10^{-3}$
Hormigón(denso, ligero, poroso)	17 a 33	$1 - 5.10^{-2}$
Ladrillo, varía según el tipo	22 a 37	$1 - 2.10^{-2}$
Vidrio	12,7	$0,6 - 2 . 10^{-2}$
Yeso	34	$0,6 - 3.10^{-2}$
Madera	20 a 23	$0,8 - 1.10^{-2}$

Tabla 13.4: Producto de la frecuencia crítica y el espesor del material y su factor de pérdidas internas.

Recordemos que la velocidad de propagación de las ondas acústicas en los fluidos es independiente de la frecuencia y depende de la densidad y compresibilidad del medio. En el caso de los medios sólidos, la velocidad de propagación de las ondas de flexión depende de la frecuencia, de la relación entre la rigidez a la flexión y la masa del material que vibra, y en consecuencia también depende de las dimensiones y del tipo de material del elemento constructivo. Como ejemplo, comparemos la longitud de onda del sonido propagado en el aire con la longitud de onda de la onda de flexión en una pared de yeso de 6 cm de espesor.

Frecuencia Hz	Ondas propagadas por el aire		Ondas de flexión en pared de yeso de espesor 6 cm	
	Longitud de onda, m	Velocidad de propagación, m/s	Longitud de onda, m	Velocidad de propagación, m/s
50	6,8	340	2,1	105
100	3,4	340	1,5	150
500	0,68	340	0,68	340
1000	0,34	340	0,48	480
5000	0,068	340	0,21	1050

En la Tabla 13.5 se muestra densidad superficial, módulos elásticos y la forma de calcular la frecuencia crítica aproximada de algunos materiales habituales en la construcción.

MATERIAL	Densidad kg/m^3	MÓDULOS DE ELASTICIDAD, $N/m^2.10^{10}$				Frecuencia crítica, Hz Espesor, h cm
		Young, **E**	Cizalladura, **G**	Volúmico,**B**	Poisson,ν	
Aluminio	2.700	7,20	2,7	7,5	0,34	1.240/h
Hierro	7.800	10,50	4,1	8,0	0,28	1.750/h
Acero	7.800	21,00	8,0	18,4	0,31	1.200/h
Latón	8.500	9,50	3,5	9,3	0,33	2.000/h
Cobre	8.900	12,50	4,6	14,0	0,35	1.700/h
Plomo	11.100	1,70	0,6	4,0	0,43	5.200/h
Yeso	1.000	0,35				3.400/h
Ladrillo	1.600	1,40				2.160/h
Hormigón	2.200	2,50				1.900/h
Vidrio	2.500	6,50	2,7	3,8	0,22	1.280/h
Corcho	200	0,0025	0,001	0,002	0,28	
Madera	600	0,50	0,2	0,26	0,18	2.220/h
Goma blanda	950	0,0005	0,0002	0,1	0,5	
Goma dura	1.100	0,25	0,09	0,4	0,4	

13.5: Tabla para el cálculo aproximado de la frecuencia crítica de algunos materiales usuales en la construcción

13.5.- ÍNDICE DE REDUCCIÓN ACÚSTICA DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES MONOLÍTICOS

Para los elementos estructurales monolíticos habituales el índice de reducción acústica en laboratorio, R, puede determinarse de manera muy precisa. En la Tabla 13.6 se muestran los valores del índice de reducción acústica calculado en bandas de octava para el caso de algunas estructuras monolíticas, según muestra la Norma EN 12354-1:2000. Acústica en la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 1: Aislamiento acústico del ruido aéreo entre recintos.

Construcción	Masa Kg/m^2	Índice de reducción acústica, dB en bandas de octava, Hz							$R_w(C,C_{tr})$
		63	125	250	500	1 k	2 k	4 k	
120 mm de hormigón	276	35	34	36	46	54	62	69	49(-2,-6)
260 mm de hormigón	598	43	42	51	59	67	74	75	61(-1,-7)
110 mm de bloques de Ca-Si	193	34	34	33	39	49	58	65	44(-1,-4)
240 mm de bloques de Ca-Si	420	38	38	46	54	62	68	68	56(-1,-6)
120 mm de hormigón ligero	156	33	36	34	35	44	53	56	42(-1,-3)
300 mm de hormigón ligero	390	37	37	42	51	58	58	58	54(-2,-6)
100 mm de hormigón aireado fabricado en autoclave	65	26	30	31	27	32	41	45	32(0,-1)
200 mm de hormigón aireado fabricado en autoclave	130	30	30	29	34	43	46	46	39(-1,-3)

Tabla 13.6: Índice de reducción acústica calculado en bandas de octava para algunas estructuras monolíticas

Los índices globales se han calculado a partir de los valores en bandas de octavas según la Norma EN ISO 717-1.

Según la Norma citada anteriormente algunas de las propiedades típicas de los materiales son

Material	Densidad, $\rho(kg/m^3)$	Velocidad longitudinal c_L (m/s)	Factor de pérdidas internas $\eta_{int}(-)$
Hormigón	2300	3500	0,006
Silicato de Calcio	1750	2600	0,015
Hormigón ligero	1300	1700	0,015
Hormigón aireado fabricado en autoclave	650	1400	0,010

13.6.- ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE PONDERADO DE REDUCCIÓN ACÚSTICA PARA ELEMENTOS ESTRUCTURALES MONOLÍTICOS A PARTIR DE SU MASA POR UNIDAD DE SUPERFICIE.

La Norma EN 12354-1:2000. Acústica en la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 1: Aislamiento acústico del ruido aéreo entre recintos, muestra una expresión para calcular el índice ponderado de reducción acústica para elementos estructurales monolíticos.

De los resultados de las mediciones realizadas en los diferentes laboratorios europeos en los últimos 30 años, en los casos que no se disponga de datos de mediciones, para elementos homogéneos de una hoja construidos con ladrillos cerámicos, hormigón, bloques de silicato de calcio, bloques de yeso, hormigón aireado fabricado en autoclave y varios tipos de hormigón aligerado, puede utilizarse para estimar de forma aproximada el índice ponderado de reducción acústica R_w la siguiente expresión (EN 12354-1):

$$m' > 150\ kg/m^2 \qquad R_w = 37{,}5.\log (m'/m'_0) - 42\ dB \qquad [13.35]$$

$m'_0 = 1\ kg/m^2$

Para los términos de adaptación espectral se considera:

C es aproximadamente constante, entre –1 y –2 dB.

$C_{tr} = 16 - 9.\log (m'/m'_0)$ dB, limitado por $-7 \leq C_{tr} \leq -1$ dB

El mortero y el yeso utilizado pueden incluirse en la determinación de la densidad superficial. Cualquier elemento estructural con agujeros no puede ser considerado como homogéneo, a menos que la dimensión de los agujeros sea pequeña y que el volumen de los agujeros sea menos de un 15 % del volumen total. En consecuencia, la expresión anterior no puede aplicarse a tabiques de ladrillo hueco tan habituales en la construcción española.

Algunas *leyes de masa* empíricas obtenidas en algunos países europeos son las siguientes:

- Austria: $m' \geq 100\ kg/m^2$; $R_w = 32{,}4.\log(m'/ m'_0) - 26{,}0$ dB
- Francia: $m' \geq 150\ kg/m^2$; $R_w = 40{,}0.\log(m'/ m'_0) - 45{,}0$ dB, C = -1 dB
- Gran Bretaña: $m' \geq 50\ kg/m^2$; $R_w = 21{,}65.\log(m'/ m'_0) - 2{,}3 \pm 1$ dB
- Alemania: $m' \geq 100\ kg/m^2$; $R_w = 31{,}7.\log(m'/ m'_0) - 27{,}6$ dB

13.7.- MEJORA DEL ÍNDICE PONDERADO DE REDUCCIÓN ACÚSTICA DE RECUBRIMIENTOS.

Si los recubrimientos (trasdosados, suelos flotantes, o techos suspendidos) se fijan a un elemento estructural básico homogéneo (elemento separador o elemento flanco) el aislamiento acústico a ruido aéreo puede aumentar o disminuir dependiendo de la frecuencia de resonancia del sistema, f_0.

1) Para elementos en los que el recubrimiento se fije directamente al elemento estructural, sin rasteles ni perfiles, la frecuencia de resonancia se calcula mediante la expresión:

$$f_0 = 160\sqrt{s'\left(\frac{m'_1 + m'_2}{m'_1.m'_2}\right)}\ Hz \qquad [13.36]$$

donde

s′, es la rigidez dinámica de la capa aislante, $s' = \frac{E_{din}}{s}\ \frac{MN}{m^3}$;

m'_1, es la densidad superficial del elemento estructural básico, kg/m^2;

m'_2, es la densidad superficial del recubrimiento, kg/m^2

2) Para recubrimientos realizados con montantes de metal o madera, o perfiles no conectados directamente al elemento estructural básico, en los que la cavidad se rellena con una capa aislante porosa de resistividad al aire, $r \geq 5$ kPa.s/m^2. La frecuencia de resonancia f_0, se calcula mediante:

$$f_0 = 160\sqrt{\frac{0{,}111}{d}\left(\frac{m_1^{'} + m_2^{'}}{m_1^{'}.m_2^{'}}\right)}\ Hz \qquad [13.37]$$

donde
d, es la profundidad de la cámara, en m.

Para elementos estructurales básicos con un índice ponderado de reducción acústica en el intervalo de valores $20 \leq R_w \leq 60$ dB, la mejora del índice ponderado de reducción acústica resultante como consecuencia del recubrimiento se puede estimar a partir de la frecuencia de resonancia f_0, redondeando al número entero más próximo, según los valores de la Tabla 13.7. Es importante observar que para frecuencias de resonancia superiores a 200 Hz se produce una disminución del índice ponderado de reducción acústica.

Frecuencia de resonancia f_0 del recubrimiento, Hz	ΔR_w , dB
≤ 80	$35 - (R_w/2)$
100	$32 - (R_w/2)$
125	$30 - (R_w/2)$
160	$28 - (R_w/2)$
200	- 1
250	- 3
315	- 5
400	- 7
500	- 9
630 – 1600	- 10
> 1600	- 5

1.- Si $f_0 < 200$ Hz, el valor mínimo de ΔR_w es 0 dB.
2.- Pueden deducirse valores intermedios de las frecuencias de resonancia mediante interpolación del log f_0
3.- R_w es el índice ponderado de reducción acústica del elemento estructural sin recubrimiento, en dB.

Tabla 13.7: Mejora del índice ponderado de reducción acústica de un recubrimiento, en función de la frecuencia de resonancia.

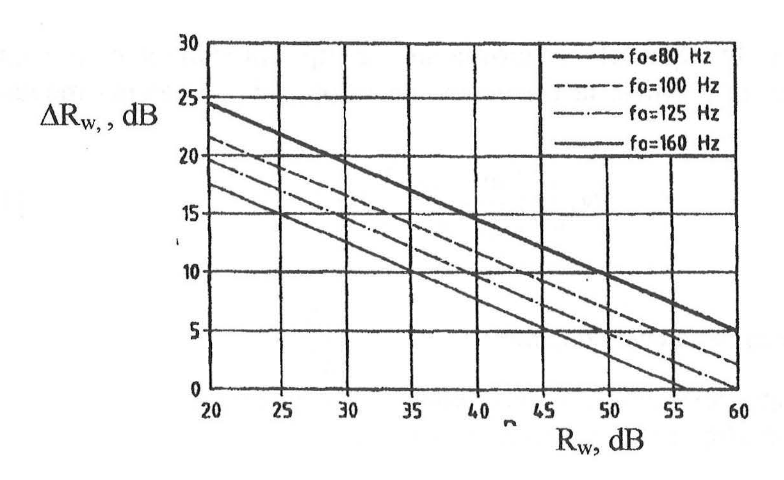


Figura 13.5: Mejora ponderado del índice R_w por un recubrimiento con frecuencia de resonancia inferior a 200 Hz, en función de R_w para un elemento estructural desnudo.

13.8.- EJEMPLOS DE ÍNDICES DE AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO, R, DE ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS HOMOGÉNEOS DE UNA HOJA.

La figura 13.6 muestra el índice de aislamiento acústico a ruido aéreo de tres elementos constructivos de una hoja. Sus frecuencias críticas aproximadas son las siguientes: Tablero de yeso laminado, f_c = 2125 Hz; tablero de contrachapado de madera, f_c = 1388 Hz; pared de hormigón de espesor 10 cm, f_c = 190 Hz.

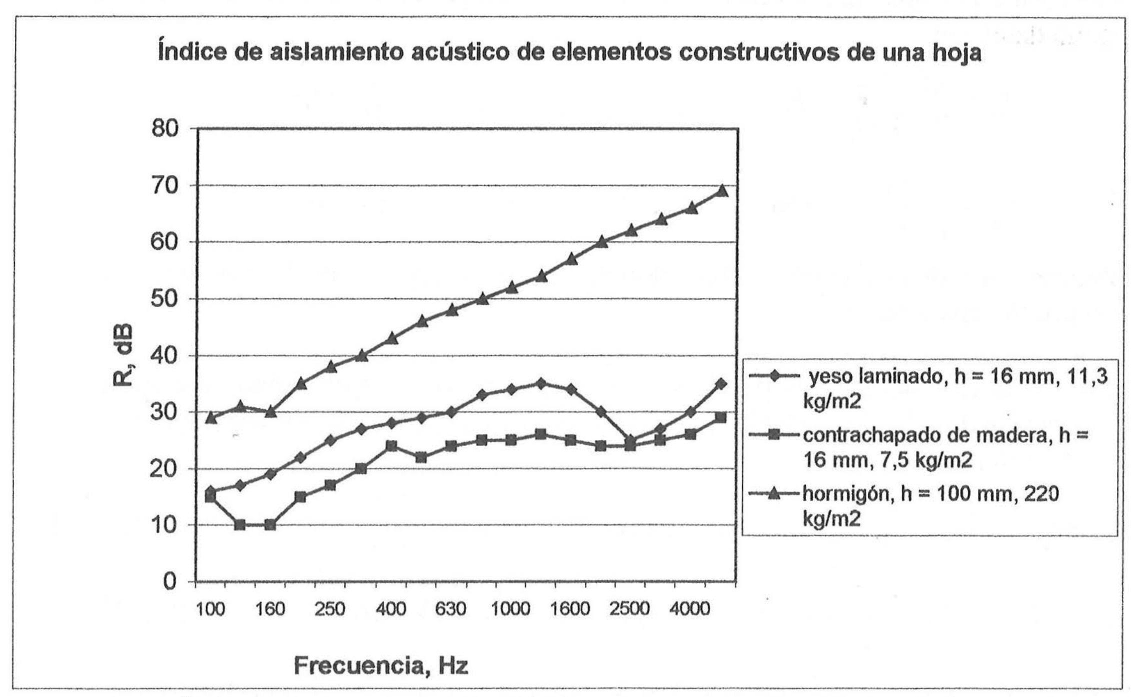
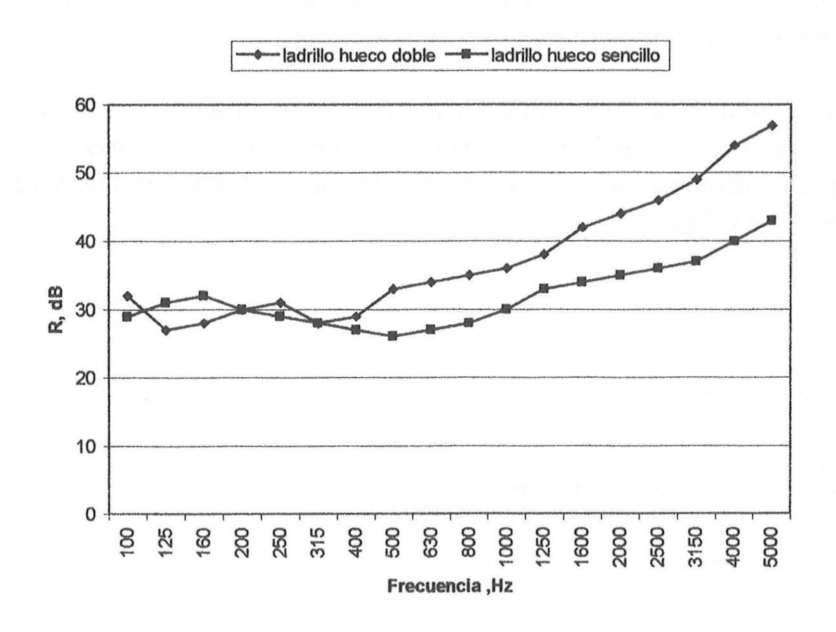


Figura 13.6: Índice de reducción acústica de tres elementos constructivos de una hoja.

.- Índices de reducción acústica a ruido aéreo de tabiques



13.9.- TRANSMISIÓN DEL SONIDO EN PLACAS ORTÓTROPAS.

La transmisión del sonido en placas ortótropas difiere de las placas isótropas porque las primeras tienen diferente rigidez en sus direcciones principales. La diferencia en la rigidez de flexión para una placa plana puede resultar de la anisotropía del material de la placa, tales como la madera, o de la construcción de la placa tales como ondulaciones, nervaduras, estampado, etc. en consecuencia la velocidad de las ondas libres de flexión es diferente para las dos direcciones y la placa ortótropa tiene dos frecuencias de coincidencia dadas por:

$$f_{c1} = \frac{c_0^2}{2\pi}\sqrt{\frac{m'}{B_x}} \quad Hz \quad , \quad f_{c2} = \frac{c_0^2}{2\pi}\sqrt{\frac{m'}{B_y}} \quad Hz \qquad [13.38]$$

$$B_y = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} Nm \quad , \quad B_x = B_y(\frac{s}{s'})\ Nm \qquad [13.39]$$

s es la longitud entre dos máximos de las ondulaciones a lo largo de la superficie y s′ la distancia entre los dos máximos.

El índice de reducción acústica R puede ser calculado de forma aproximada mediante las expresiones deducidas por Heckl (1960).Untersuchungen an orthotropen platten. Acústica, 10, 109-115.

$$f_{c1} \le f \langle 0{,}5 f_{c2} \quad R = 20\log f + 10\log m' - 10\log f_{c1} - 20\log\left[Ln\left(\frac{4f}{f_{c1}}\right)\right] - 13{,}2 \quad dB \qquad [13.40]$$

$$f > 2f_{c2} \qquad R = 20\log f + 10\log m' - 5\log f_{c1} - 5\log f_{c2} - 23 \quad dB \qquad [13.41]$$

Entre $0{,}5f_{c2}$ y $2f_{c2}$, R se estima uniendo los puntos con un segmento rectilíneo en un gráfico en función del logaritmo decimal de la frecuencia. El procedimiento se aplica de la misma forma en el intervalo de frecuencias $f_{c1}/2$ y f_{c1}.

Hay dos consideraciones a tener en cuenta cuando utilizamos las expresiones anteriores del índice de reducción sonora R para placas ortótropas:

- En paneles ondulados habituales, entre 2000 y 4000 Hz hay un descenso en los valores de R de hasta 5 dB, en los valores medidos respecto a los previstos en la teoría.
- En paneles de pequeñas dimensiones, el índice de reducción sonora R es subestimado por debajo de alrededor de $0{,}7f_{c1}$.

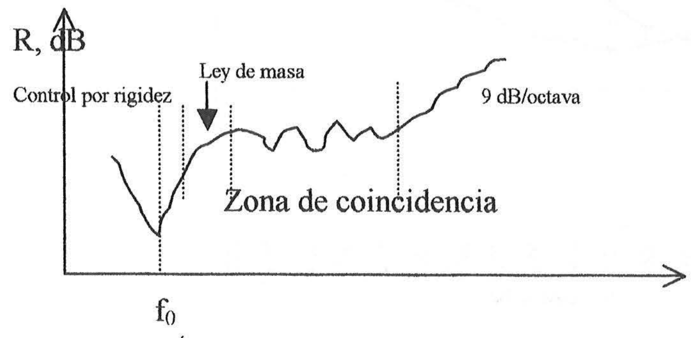


Figura 13.7: Índice de reducción acústica de un panel ortótropo con un intervalo de frecuencias críticas.

La figura 13.8 muestra los resultados de las mediciones en laboratorio del índice de reducción acústica R de dos placas de acero, una plana de masa por unidad de superficie 8 kg/m^2 y R_A = 31,5 dB; la otra ondulada de masa por unidad de superficie 11 kg/m^2 y R_A= 21,8 dB.

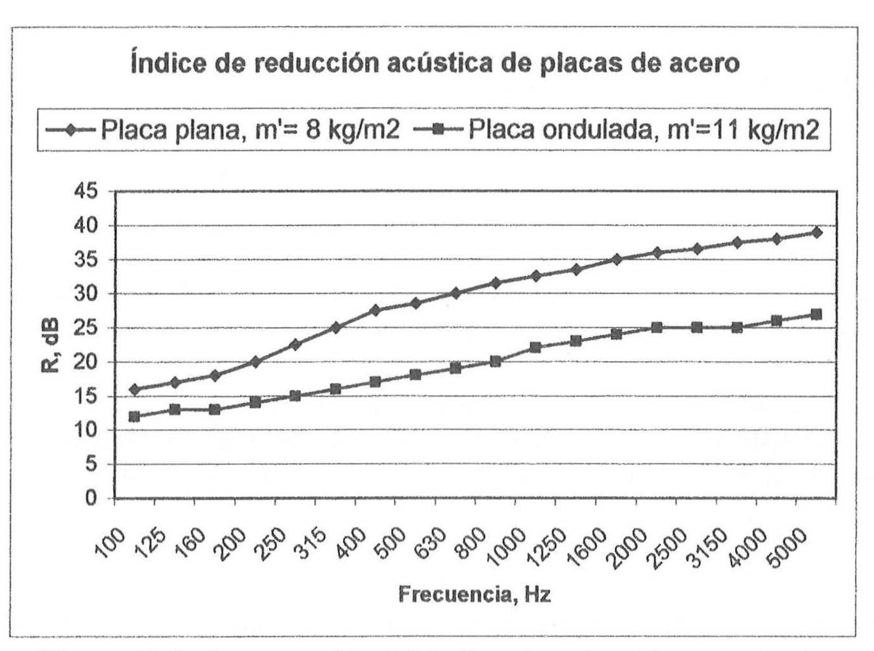


Figura 13.8: Comparación del índice de reducción acústica de dos placas de acero plana y ondulada

13.10.- AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO DE PARTICIONES DOBLES.

Una partición doble está constituida por dos particiones simples separadas por un espacio, relleno o no de material absorbente. Para aumentar el aislamiento entre dos recintos sin incrementar mucho la masa, uno de los procedimientos consiste en dividir la partición en dos hojas separadas una distancia.

Cuando las ondas sonoras del recinto emisor inciden sobre la primera hoja, esta se excita y transmite al aire situado en la cavidad entre hojas una vibración, que a continuación incide sobre la segunda hoja, y esta a su vez transmite energía sonora al recinto receptor.

Factores importantes a tener en cuenta en el aislamiento a ruido aéreo en particiones dobles son los siguientes:

Frecuencias críticas de las hojas
Hay que evitar que las dos hojas tengan la misma frecuencia crítica, si esto ocurre la partición doble presentará un importante defecto de aislamiento en la banda de la frecuencia crítica.

Frecuencia de resonancia del sistema o frecuencia masa-aire-masa
Una partición doble *sin material absorbente en la cavidad* se comporta como un sistema mecánico masa-muelle-masa. El sistema tiene una frecuencia de resonancia que cuando las ondas inciden perpendicularmente a la partición, se obtiene mediante la expresión:

$$f_{mam} = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{d}\left(\frac{1}{m_1^{'}} + \frac{1}{m_2^{'}}\right)} \qquad [13.42]$$

que en forma aproximada se puede escribir

$$f_{mam} = 60\sqrt{\frac{1}{d}\left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2}\right)} \qquad [13.43]$$

d es la separación entre las dos hojas en m, m'_1 y m'_2 son las masas superficiales de las paredes en kg/m^2. Cuando las ondas inciden aleatoriamente la frecuencia de resonancia se obtiene multiplicando el valor anterior por 1,4.

Si la frecuencia del sonido incidente es mayor que la frecuencia de resonancia del sistema el aislamiento de la partición doble es mejor que el de una partición simple de la misma masa. En la práctica hay que lograr que la frecuencia de resonancia del sistema esté por debajo de 70 Hz.

Frecuencias de resonancia de la cavidad
En la cámara de aire existente entre las dos hojas, las ondas sonoras se propagan y se reflejan sobre las caras internas de las mismas y se originan ondas estacionarias. A las frecuencias de resonancia la presión sonora en la cavidad aumenta y se transmite más sonido por las hojas de la partición, el aislamiento de la partición presenta un mínimo.

Para ondas planas que se propagan en dirección normal a la partición, la frecuencia de resonancia de la cavidad se obtiene mediante la expresión:

$$d = n\frac{\lambda}{2} \quad ; \quad \lambda = \frac{2d}{n}$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c.n}{2d} = \frac{170.n}{d} \qquad [13.44]$$

n = 1,2,3,.. , d en m. En general, únicamente las frecuencias de resonancia de la cavidad para n = 1 y 2 son perjudiciales para el aislamiento de la pared doble. Hay que lograr que las frecuencias de resonancia de la cavidad superen los 4.000 Hz.

Influencia de la colocación de material absorbente en la cavidad
La colocación de material absorbente en la cavidad modifica el acoplamiento acústico entre las dos hojas de la partición.

Cuando en la cavidad se coloca material absorbente disminuye la frecuencia de resonancia del sistema aproximadamente al 70% del valor calculado para f_{mam}.
El material absorbente en la cavidad elimina la frecuencia de resonancia de la cavidad y aumenta el aislamiento al ruido aéreo de la partición doble.

No es necesario el rellenar completamente la cavidad con material absorbente, el mayor aumento del aislamiento ocurre cuando el material absorbente ocupa el 25% de la

anchura de la cámara. El material absorbente deberá tener una resistividad al flujo de aire mayor de 5 kPa.s/m^2, valor que cumplen la mayoría de los materiales fibrosos habituales.

Se debe evitar el rellenar completamente la cámara de material absorbente de alta densidad.

Módelo teórico del aislamiento a ruido aéreo de una partición doble ilimitada. Fórmulas de predicción de Sharp.

B.H. Sharp,(1978). "A Study of Techniques to Increase the Sound Insulation of Building Elements". NTIS PB 222829/4, U.S. Department of Housing and Urban Development, Washington DC; "Prediction Methods for the Sound Transmission of Buildings Elements", Noise Control Eng., 11(2), 53-63.

En el caso de una partición doble formada por dos hojas de masas por unidad de superficie m'_1 y m'_2 con una distancia entre ellas de d m. Cuando las dos hojas están completamente aisladas entre si mecánica y acústicamente, se puede probar que el índice de aislamiento acústico del sistema se puede obtener de forma aproximada por las siguientes expresiones:

$$R = 20.\lg\left[(m_1' + m_2')f\right] - 47\ dB \quad para\ f \langle f_{mam} \qquad [13.45]$$

$$R = R_1 + R_2 + 20.\lg fd - 29\ dB \quad para\ f_{mam} \langle f \langle \frac{c}{2\pi d} \approx \frac{55}{d} \qquad [13.46]$$

$$R = R_1 + R_2 + 6 \quad dB \quad para \quad f \rangle \frac{c}{2\pi d} \approx \frac{55}{d} \qquad [13.47]$$

R_1 y R_2 son los índices de reducción sonora para cada hoja medidos o calculados separadamente.

Las ecuaciones anteriores están deducidas bajo la hipótesis que las ondas estacionarias en la cavidad han sido eliminadas. Esto se consigue llenandola con materiales absorbentes acústicos porosos. En la práctica es muy dificil construir una pàrtición doble que cumpla las predicciones de las ecuaciones anteriores.

El aumento del índice de aislamiento acustico es mayor cuanto menor sea el número de uniones entre los dos elementos, las uniones por puntos son más eficaces que las uniones por líneas. Cuanto más rígida sea la unión entre los paneles, menor será el índice de reducción acústica a ruido aéreo.

Regla práctica para determinar el aislamiento al ruido aéreo de una pared doble delgada sin material absorbente acústico en la cavidad.

El estudio teórico del modelo de pared doble, nos indica que a frecuencias por encima de la de resonancia, el aislamiento aumenta a razón de 18 dB/octava, sin embargo en la práctica estos aislamientos no se obtienen. Una expresión que se relaciona bien con los resultados experimentales, *para paredes delgadas sin material absorbente acústico en su interior*, es la obtenida por Ford- Lord, (1968, JASA 1062-1068):

$$R_{500} = 20.\lg(m'd) + 34 \text{ dB} \qquad [13.48]$$

$m' = m'_1 + m'_2$, masa por unidad de área del conjunto, kg/m^2; d, es la separación entre paredes, en m.

Tomado este valor como el aislamiento a 500 Hz, se puede representar un segmento rectilíneo de pendiente 6 dB/octava, según la figura 13.9.

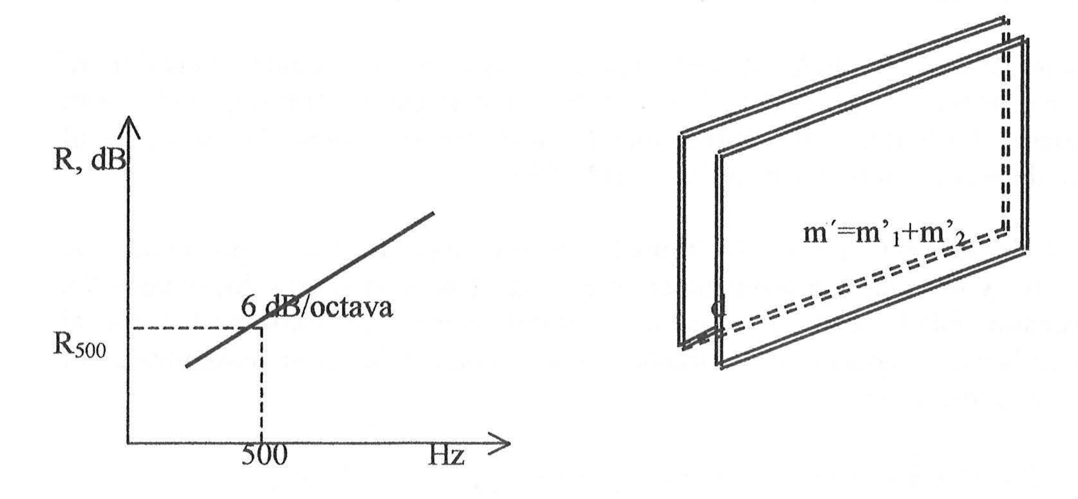


Figura 13.9: Regla para determinar el índice de aislamiento acústico de paredes dobles delgadas, sin material absorbente acústico en la cavidad.

La figura 13.10 mustra los resultados de un ensayo de laboratorio. La muestra ensayada es una pared doble de albañilería constituida por pared de citara de ladrillo cerámico perforado, cámara de aire de 5 cm y tabique de ladrillo hueco sencillo, guarnecida una cara con mortero de cemento y la otra con mortero de yeso. La masa por unidad de superficie es 265 kg/m^2. El aislamiento acústico global a ruido aéreo en dB ponderados a es $R_A = 51$ dB.

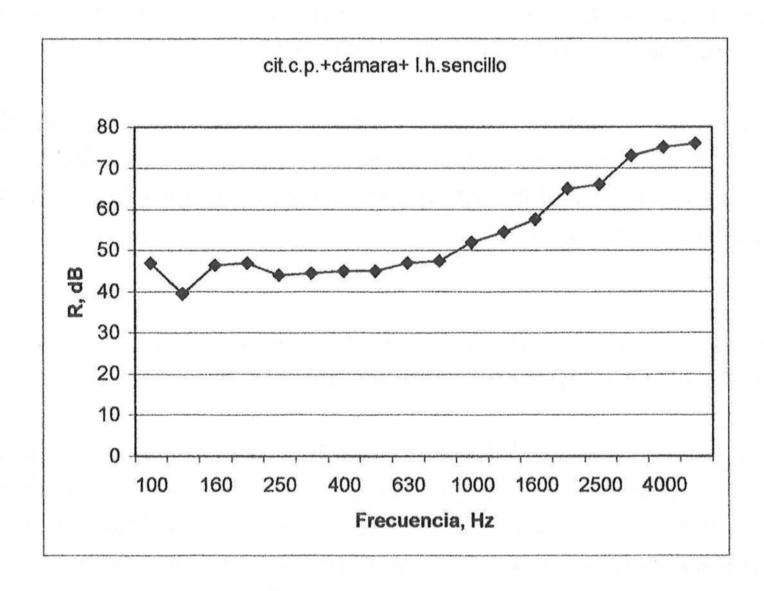


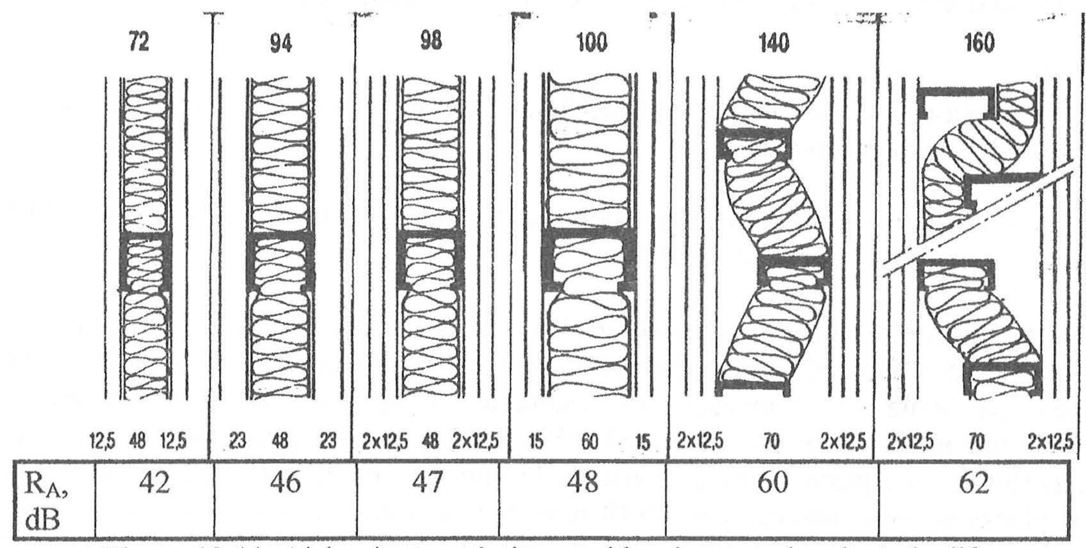
Figura 13.10: Índice de reducción acústica de una pared doble de albañilería.

13.11 – AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO DE TABIQUES DE YESO LAMINADO.

En la actualidad, en los edificios administrativos, comerciales e industriales las particiones interiores se realizan, en muchos casos, con tabiques de perfilería metálica constituidos por un entramado de perfiles de chapa cincada, una capa intermedia de lana mineral y una capa de placas de yeso laminado en cada lado. La mayoría de los fabricantes ofrecen productos homologados para el cumplimiento de las normativas acústicas y contra incendios e indican la forma de montaje correcta.

Es muy importante realizar una ejecución cuidadosa evitando puentes acústicos en las uniones con el techo, suelo y paredes, con las instalaciones eléctricas, calefacción, etc.

A continuación, en la figura 13.11, se muestran varios tipos de tabiques divisorios con el valor obtenido en laboratorio de su aislamiento acústico a ruido aéreo ponderado A.

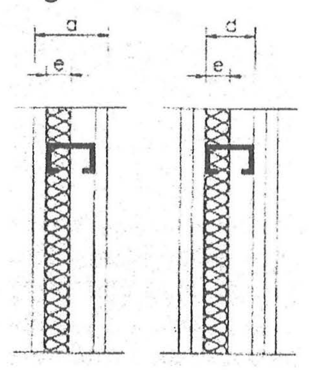


R_A, dB	42	46	47	48	60	62

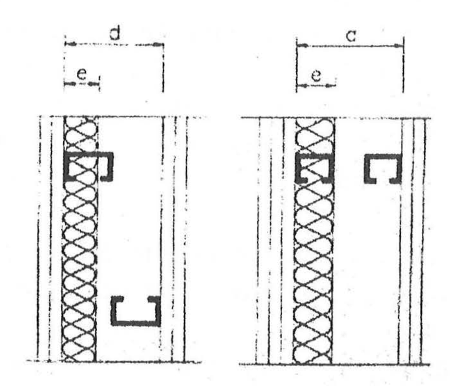
Figura 13.11: Aislamiento acústico a ruido aéreo ponderado A de diferentes tipos de tabiques de yeso laminado.

La eficacia de estos tabiques como aislantes del ruido aéreo se puede ver muy afectada por las transmisiones indirectas, huecos no sellados, fisuras, aberturas alrededor de las tuberías, tomas de corriente, etc.

Expresiones de la previsión del índice ponderado de reducción sonora R_w de acuerdo con la Norma DIN 4109 son los siguientes:



Armazón único: $R_w = 20.\log(m'/1\ kg\ m^2) + 20.\log(d/1\ cm) + e + 5\ dB$ [13.49]



Armazón doble: $R_w = 20.\log(m'/1\ kg\ m^2) + 20.\log(d/1\ cm) + e + 10\ dB$ [13.50]

donde
m', es la masa total por unidad de superficie; d, la anchura de la cámara en cm; e, el espesor del panel de fibra en cm.

El ámbito de aplicación de las expresiones anteriores es hasta masas totales de 70-80 kg/m^2 y espesores máximos de 25-30 cm.

En este tipo de tabiques la colocación de un material absorbente acústico entre las placas de yeso laminado aumenta de forma importante el aislamiento acústico a ruido aéreo. La figura 13.12 muestra los resultados de los ensayos de laboratorio del aislamiento a ruido aéreo de una pared doble formada por dos placas de yeso laminado de 2x18 mm de espesor, cámara de aire de 36 mm con lana de roca (sin lana de roca) y dos placas de yeso laminado de 2x18 mm. Sin lana de roca en la cámara el índice ponderado de reducción acústica R_w es 40 dB y con lana de roca en la cavidad R_w= 49 dB.

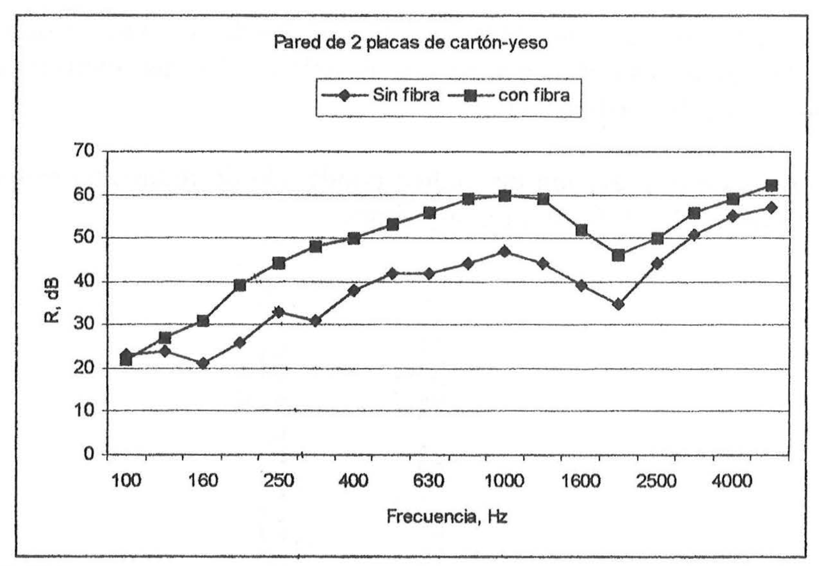


Figura 13.12: Efecto en el aislamiento a ruido aéreo de la colocación de fibra en la cávidad de una pared doble de yeso laminado.

13.12 – AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO DEL VIDRIO.

El vidrio utilizado habitualmente en la construcción es un compuesto silico-sodo-cálcico. Su densidad es 2500 kg/m^3. Es un material elástico (E = 7.10^{10} Pa, ν = 0,22) y frágil.

A continuación se comentan algunas características de su comportamiento acústico, según que el acristalamiento sea vidrio monolítico, laminado o acristalamiento doble.

Vidrio monolítico

En el intervalo de frecuencias próxima a la frecuencia crítica, el índice de aislamiento acústico disminuye de 10 a 15 dB. La frecuencia crítica del vidrio monolítico depende de forma inversamente proporcional del espesor del vidrio, h, de acuerdo con la expresión: $f_c = \dfrac{1280}{h\ cm}\ Hz$. Por ejemplo, un vidrio con un espesor de 4 mm su frecuencia crítica es aproximadamente 3200 Hz.

Acristalamiento doble

En el caso del acristalamiento doble se tienen que considerar fundamentalmente:

- Las frecuencias críticas de cada uno de los vidrios. Se aconseja que desde el punto de vista del aislamiento acústico a ruido aéreo los dos vidrios sean asimétricos.
- La frecuencia f_{mam} del sistema. Debe ser lo más baja posible, se consigue con vidrios gruesos y aumentando la distancia entre ellos.
- Las frecuencias de resonancia de la cavidad.

La introducción de un gas especial, SF6, en la cámara mejora el aislamiento acústico a medias y altas frecuencias, disminuyendo a frecuencias bajas.

Vidrio laminado

El vidrio laminado está compuesto por dos o más vidrios unidos por materia plástica, butiral de polivinilo, PVB, o un butiral especial acústico, PVB(A). El índice de aislamiento acústico a ruido aéreo de un vidrio laminar es varios dB superior al de un vidrio monolítico del mismo espesor, sobretodo en la zona de la frecuencia crítica. El vidrio laminar con PVB(A), prácticamente elimina el efecto de coincidencia.

En siguientes apartados se analizará el aislamiento acústico a ruido aéreo de las fachadas de los edificios y en particular el aislamiento a ruido aéreo de las ventanas, que consta de marco, bastidor y vidrio. El vidrio está soportado por un bastidor (madera, aluminio, PVC, etc). Se presentan problemas de estanquidad en las juntas, practicabilidad de la ventana, cajón de la persiana, etc.

En la tabla 13.8 se muestran los índices de reducción acústica de diferentes tipos de vidrio de acuerdo con la norma EN 12354-1.

Tipo de vidrio	Índice de reducción acústica, R, dB						
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1.000 Hz	2.000 Hz	4.000 Hz	$R_w(C,C_{tr})$, dB
Vidrio sencillo, mm							
3	14	19	25	29	33	25	28(-1,-4)
4	17	20	26	32	33	26	29(-2,-3)
5	19	22	29	33	29	31	30(-1,-2)
6	18	23	30	35	27	32	31(-2,-3)
8	20	24	29	34	29	37	32(-2,-3)
10	23	26	32	31	32	39	33(-2,-3)
12	27	29	31	32	38	47	34(0,-2)
Vidrio laminado + lámina plástica (0,5-1) mm							
6 +	20	23	29	34	32	38	32(-1,-3)
8+	20	25	32	35	34	42	33(-1,-3)
10+	24	26	33	33	35	44	34(-1,-3)
Vidrio doble con vidrios sencillo o laminado, (mm), cavidad llena de aire e = (6-16) mm							
4-(6-16)-4	21	17	25	35	37	31	29(-1,-4)
6-(6-16)-4	21	20	26	38	37	39	32(-2,-4)
6-(6-16)-6	20	18	28	38	34	38	31(-1,-4)
8-(6-16)-4	22	21	28	38	40	47	33(-1,-4)
8-(6-16)-6	20	21	33	40	36	48	35(-2,-6)
10-(6-16)-4	24	21	32	37	42	43	35(-2,-5)
10-(6-16)-6	24	24	32	37	37	44	35(-1,-3)
6-(6-16)-6+	20	19	30	39	37	46	33(-2,-5)
6-(6-16)-10+	24	25	33	39	40	49	37(-1,-5)

Tabla 13.8: Índice de reducción acústica según el tipo de vidrio.(Norma en 12354-3).

La figura 13.13 muestra los resultados de las mediciones realizadas en laboratorio de diversos tipos de acristalamiento.

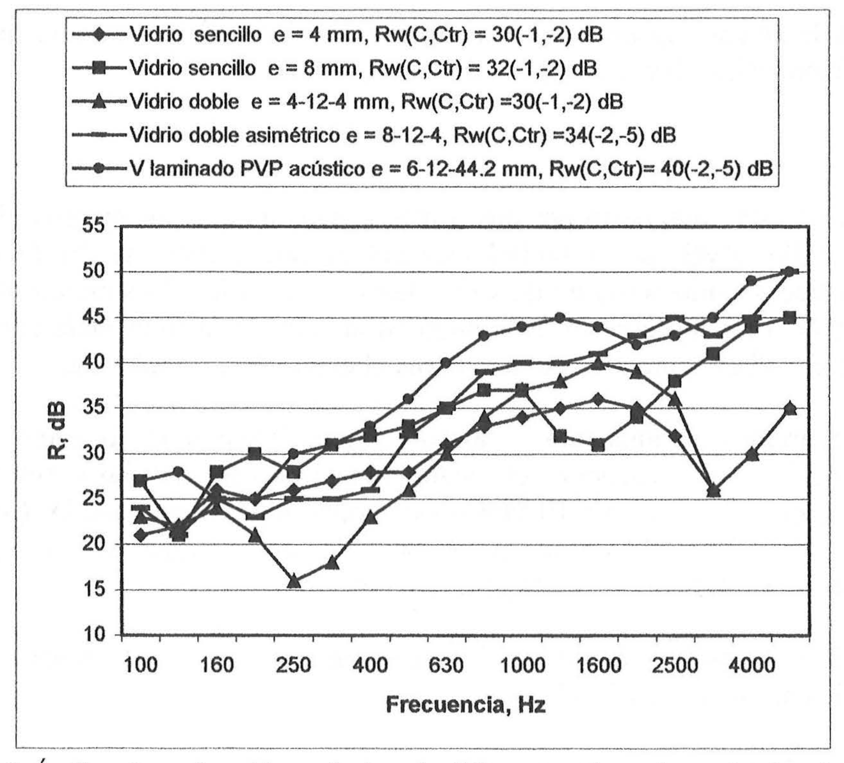


Figura 13.13: Índice de reducción acústica de diferentes tipos de acristalamiento.

Para determinar el índice de reducción sonora de una ventana acristalada con los datos de la tabla 13.8, se ha de tener en cuenta la transmisión del sonido a través del marco de la ventana y el sellado. Para un gran grupo de acristalamientos, de R_w menor de 37 dB, la transmisión del sonido a través del marco puede ser ignorada.

13.13 - AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO DE MATERIALES ABSORBENTES POROSOS.

Todavía es habitual oír la idea errónea que los materiales absorbentes acústicos de tipo poroso por si mismos tienen un buen comportamiento en el aislamiento acústico a ruido aéreo.

El revestimiento interior de las paredes de un recinto nos servirá para controlar el sonido reverberante y aumentará el aislamiento a ruido aéreo de las paredes a altas frecuencias. Por otra parte la colocación de estos materiales en la cavidad entre dos hojas aumenta de forma importante el índice de aislamiento a ruido aéreo R del sistema. La colocación de fibra mineral entre el suelo flotante y el suelo estructural aumenta el índice de aislamiento a ruido aéreo y a ruidos de impacto de los elementos horizontales de separación entre locales.

Por ejemplo para una manta de lana de roca de espesor 50 mm y densidad media, el índice de aislamiento al ruido aéreo R, es del orden siguiente:

Frecuencia, Hz	1000	2000	4000	8000
R, dB	0,5	1,5	4	12

Cuanto más poroso es el material menor es su aislamiento al ruido aéreo, este aumenta al hacerlo la resistividad al flujo de aire, magnitud que depende fundamentalmente de la densidad y el tamaño de la fibra.

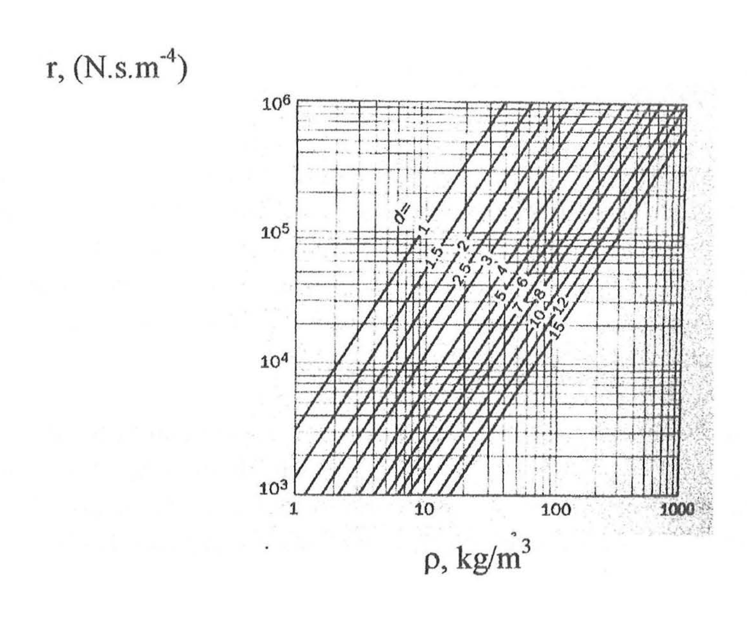


Figura 13.14: Resistividad al flujo de aire en función de la densidad del material y el diámetro de la fibra d(μm)

La figura 13.15 muestra los resultados de las mediciones realizadas en laboratorio de un elemento constructivo de dos hojas formado por: mortero de yeso + ladrillo hueco sencillo (formato: 24,25 cm de largo, 11,15 cm de alto y 3,65 cm de espesor) + mortero de yeso + cámara de 5 cm + ladrillo hueco sencillo + mortero de yeso. El aislamiento a ruido aéreo de este sistema es $R_A = 40$ dB. Al introducir en la cámara lana de vidrio, el nuevo valor del aislamiento a ruido aéreo es $R_A = 47$ dB.

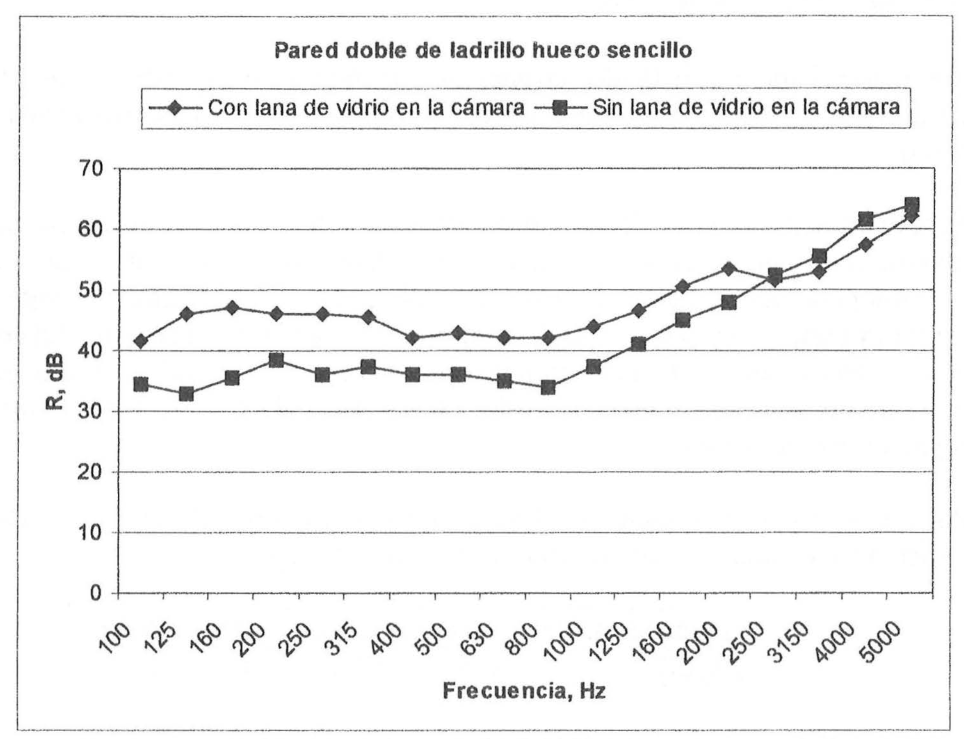


Figura 13.15: Efecto de la introducción de material poroso en la cavidad de una pared doble de ladrillo hueco sencillo.

13.14- AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO DE PARTICIONES MIXTAS.

Lo habitual es que las particiones de los recintos estén compuestas por elementos constructivos diferentes. Cada uno de los elementos está caracterizados por un índice de aislamiento acústico a ruido aéreo. Por ejemplo fachadas con ventanas y/o balcones, paredes con puertas, cubiertas con claraboyas, etc. Las paredes o cerramientos suelen tener aberturas, aparte de ventanas y puertas, tales como orificios de ventilación, paso de canalizaciones, fisuras, etc.

Se considera una pared de área S m^2, constituida por un elemento de área S_1 m^2 e índice de aislamiento acústico a ruido aéreo R_1, dB y otro elemento de área S_2 m^2 e índice de aislamiento acústico a ruido aéreo R_2, dB. El aislamiento global de la pared dependerá de las diferencias entre R_1 y R_2 y de las relaciones entre las áreas parciales S_1 y S_2 y el área total S.

Cuando en el recinto emisor la energía acústica es la misma y la transmisión es directa, la pared que separa del recinto receptor transmite energía acústica proporcionalmente a su área. En nuestro caso, el coeficiente de transmisión resultante es:

$$\tau(S_1 + S_2) = \tau_1 S_1 + \tau_2 S_2$$

$$\tau = \frac{S_1}{S}\tau_1 + \frac{S_2}{S}\tau_2 \qquad [13.51]$$

De la definición del índice de reducción acústica se puede deducir el coeficiente de transmisión de cada elemento

$$R_i = 10\lg\frac{1}{\tau_i}$$

$$\tau_i = 10^{-0,1R_i}$$

El índice de aislamiento acústico al ruido aéreo global de la pared es

$$R_G = 10\lg\frac{1}{\tau} = -10\lg(\frac{S_1}{S}.10^{-0,1R_1} + \frac{S_2}{S}.10^{-0,1R_2}) \quad \text{dB} \qquad [13.52]$$

En general el índice de aislamiento a ruido aéreo global de la partición mixta, puede estimarse a partir de la siguiente expresión:

$$R_G = -10.\lg\frac{\sum_i S_i.10^{-0,1R_i}}{\sum_i S_i} \quad dB \qquad [13.53]$$

S_i es el área del elemento constructivo i, en m^2, y R_i es el aislamiento a ruido aéreo del elemento constructivo de área S_i,, en dB.

Un caso común de una partición mixta, es el de la fachada de un recinto que incluye una parte ciega de área S_c y un hueco cerrado por una ventana de área S_v, de aislamientos a ruido aéreo R_c y R_v respectivamente. El área de la fachada es $S_f = S_c + S_v$. El aislamiento global del elemento mixto lo podemos escribir:

$$R_G = -10.\log\left[(\frac{S_v}{S_f}).10^{-0,1R_v} + (\frac{S_c}{S_f}).10^{-0,1R_c}\right] \quad dB \qquad [13.54]$$

Si definimos como factor de hueco de la fachada: $\beta = \frac{S_v}{S_f}$. El aislamiento al ruido aéreo global de la fachada se obtiene mediante la expresión:

$$R_G = -10.\lg\left[\beta.10^{-0,1R_v} + (1-\beta).10^{-0,1R_c}\right] \quad dB \qquad [13.55]$$

De la expresión anterior, se deduce que el índice de aislamiento a ruido aéreo de la fachada mixta está condicionado por el índice de aislamiento a ruido aéreo de la ventana y, es como máximo 10 dB mayor a R_v.

El índice de aislamiento a ruido aéreo de una partición mixta está condicionado por el índice de aislamiento acústico a ruido aéreo del elemento constructivo más débil. De aquí la gran importancia de lograr soluciones constructivas equilibradas y el evitar aberturas y grietas en los cerramientos. Cuando hay que mejorar el índice de aislamiento acústico a ruido aéreo de una partición mixta hay que comenzar por mejorar el aislamiento acústico a ruido aéreo del elemento constructivo más debil.

13.15 - INFLUENCIA DE LA PERMEABILIDAD EN EL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO.

Generalmente los resultados de los ensayos de aislamiento a ruido aéreo de elementos constructivos realizados en laboratorio se obtiene con las superficies recubiertas con buenos enlucidos de yeso o cemento. En la realización de una pared, es usual que queden huecos cuando únicamente existe el mortero de cemento entre los ladrillos. El guarnecido de al menos una de las caras de la pared mejora de forma muy importante el aislamiento al ruido aéreo. En la figura 13.16 se muestran los resultados del efecto del guarnecido de una pared de ladrillo hueco doble. Cuando la pared no está guarnecida el aislamiento acústico $R_A = 26$ dB, cuando esta guarnecida por las dos caras $R_A = 37$ dB.

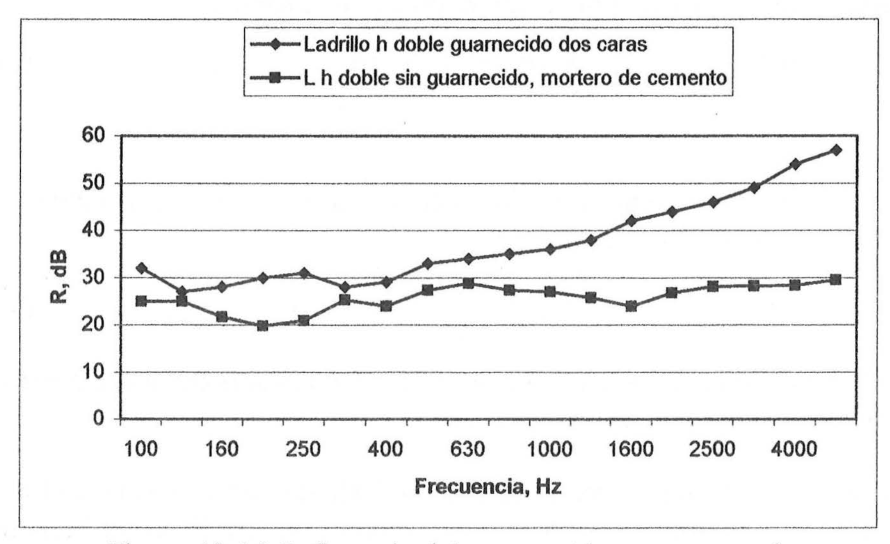


Figura 13.16: Influencia del guarnecido en una pared.

13.16.- AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO ENTRE RECINTOS. LAS TRANSMISIONES INDIRECTAS POR VÍA SÓLIDA.

El aislamiento acústico a ruido aéreo entre dos recintos contiguos es menor que el aislamiento acústico a ruido aéreo de la pared separadora, esto es debido a que las ondas acústicas se transmiten por los paramentos adyacentes a la pared de separación entre los recintos, a esta transmisión se la conoce con los nombres de *transmisiones indirectas, (flancos o colaterales) por vía sólida.* El valor de las transmisiones indirectas es función de las características de sus elementos componentes, de la geometría y del sistema constructivo.

Para conocer el aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos se necesita saber la cantidad de energía acústica que se transmite por cada uno de los posibles caminos de transmisión. De poco sirven los resultados obtenidos en laboratorio del aislamiento acústico al ruido aéreo de una pared, cuando en la práctica nos encontramos siempre con paredes trabadas entre sí. La UNE-EN 12354-1 describe modelos de cálculo para estimar el aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos de edificios, utilizando en primer lugar los resultados de las medidas de las transmisiones directas e indirectas a través de los elementos constructivos del edificio y posteriormente métodos teóricos obtenidos a partir de la propagación de las ondas acústicas en los elementos estructurales.

Si tenemos dos recintos adyacentes, la potencia acústica en la sala receptora es debido al sonido radiado por los elementos estructurales de separación y los elementos estructurales de flancos.

Se llaman *transmisiones directas del ruido aéreo* a las que interviene exclusivamente el elemento separador. Comprenden las debidas al sonido que incidiendo en el elemento separador es radiado por este hacía el receptor, y el ruido aéreo transmitido, a través de partes del elemento separador, tales como rendijas, respiraderos, dispositivos de aire acondicionado, etc. el resto de las transmisiones no directas, son las *transmisiones indirectas o por flancos*. En estas conviene distinguir las *transmisiones indirectas por vía aérea*: techos suspendidos, sistemas de ventilación, corredores, etc. y las *transmisiones indirectas por vía sólida:* paredes, techos, suelos, etc. La figura 13.17 muestra esquemáticamente estos caminos de transmisión.

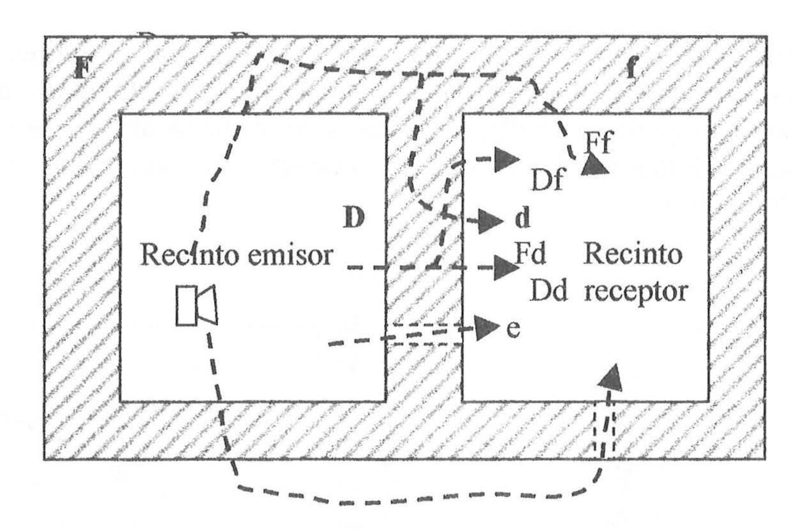


Figura 13.17: Caminos de transmisión de las ondas acústicas entre dos recintos.

El factor total de transmisión puede ser considerado la suma de los factores de transmisión de cada una de las partes.

Cuanto mayor es el aislamiento acústico a ruido aéreo a través del elemento constructivo de separación entre dos recintos, tienen mayor importancia las transmisiones indirectas. En consecuencia no tiene sentido aumentar el aislamiento acústico a ruido aéreo del elemento separador, si el nivel de presión acústica en el recinto receptor se debe básicamente a las transmisiónes indirectas.

En los edificios habituales, las transmisiónes acústicas a través de las paredes adyacentes únicamente es despreciable cuando la pared de separación entre los dos recintos es delgada en comparación con las que la rodean. En todos los demás casos, las transmisiones indirectas son importantes, y en algunos casos pueden ser predominantes. La transmisión indirecta es tanto mayor cuanto más ligeros son los elementos constructivos adyacentes. Únicamente cuando la masa por unidad de superficie de los elementos constructivos adyacentes es $\geq$ 400 kg/m^2 puede no tenerse en cuenta la transmisión indirecta del sonido.

En el caso de una pared sencilla, la diferencia de niveles entre dos locales D, se puede relacionar de *forma aproximada* con el índice de aislamiento acústico a ruido aéreo medido en el laboratorio R de la pared de separación, mediante la siguiente expresión:

$$D = R + 10\lg\frac{S}{A} - C \quad dB$$

S es el área de la pared separadora, A la absorción sonora equivalente del local receptor, y C es una constante que varía de 3 a 10 dB, según las masas respectivas de las paredes, geometría y sistema constructivo.

En cada unión del recinto hay una cierta cantidad de atenuación acústica que depende del tipo de unión, relación entre masas y amortiguamiento acústico de los componentes. En los edificios de viviendas aproximadamente el 50% del sonido incidente se transmite por vía indirecta. Si se desea obtener un elevado aislamiento a ruido aéreo entre recintos adyacentes se debe dedicar una atención especial a la disminución de las transmisiones indirectas.

La figura 13.18 muestra el efecto de las transmisiones indirectas de paredes dobles ligeras sobre un suelo pesado. Estas paredes tiene en laboratorio un índice de reducción sonora R_w superior a 55 dB, sin embargo su valor in situ R'_w se ve muy afectado por el promedio de la masa de la unidad de superficie de los elementos constructivos que están ligados a ellas.

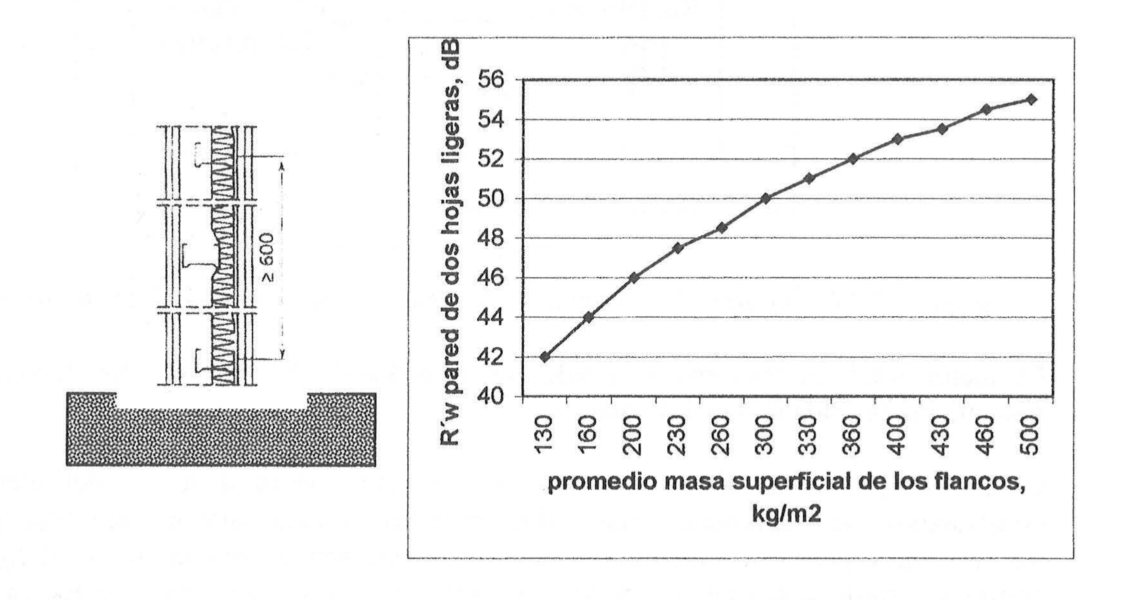


Figura 13.18: Efectos de las transmisiones indirectas de paredes dobles ligeras sobre forjados pesados.

En la figura 13.19 se muestra el efecto de las transmisiones por flancos en el aislamiento a ruído aéreo entre recintos. La pared separadora, muy habitual en la edificación española, es de citara de ladrillo cerámico perforado enlucido por las dos caras. Este elemento constructivo en laboratorio tiene un índice global de aislamiento acústico R_A = 47 dB ponderados A . En las mediciones realizadas in situ entre recintos los resultados promedios son R'_A = 41 dB ponderados A.

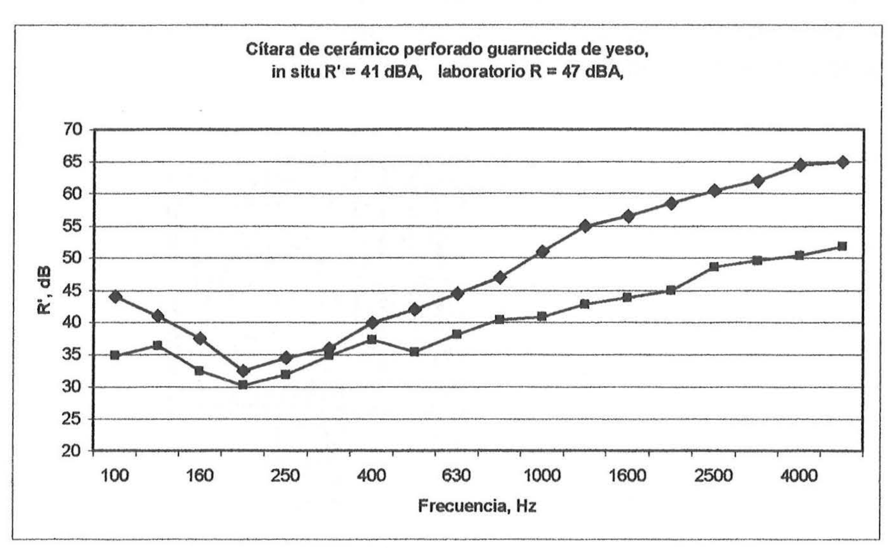


Figura 13.19: Comportamiento acústico de una pared de citara de ladrillo cerámico perforado en laboratorio e in situ.

13.17 – AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO DE LAS VENTANAS

El hueco de la fachada es un elemento complejo del edificio tradicional. El cerramiento del hueco se debe realizar con ventanas o balcones de calidad. En la actualidad se dispone de excelentes acristalamientos acústicos que deben ir acompañados de carpinterías de igual calidad.

Una ventana, desde el punto de vista arquitectónico, es la parte transparente de la fachada que permite la relación interior/exterior, así como la entrada de aire, iluminación natural, radiación solar y la visión en ambos sentidos. Aproximadamente el 90 % de la ventana es vidrio, soportado sobre unos bastidores de diferentes materiales: madera, aluminio, PVC, poliuretano y mixtos, que permiten la apertura y el cierre de la ventana y protegen el interior de las inclemencias externas. Una ventana está formada por un bastidor y el vidrio, así como el marco, en consecuencia existe un problema de juntas entre ellos. Las ventanas y puertas se suelen clasificar en clases 1, 2, 3 y 4 según su permeabilidad al aire, (UNE-EN 12207, abril 2000).

La utilización de ventanas o puertas con hojas de practicabilidad corredera o deslizante disminuye de forma importante el valor de su índice de aislamiento acústico a ruido aéreo. La figura 13.21 muestra en valores promedios, la diferencia del comportamiento acústico de la diferencia de niveles estandarizada $D_{ls,2m,nT}$ de las fachadas de dormitorios con ventanas de practicabilidad deslizante horizontal (1.500 dormitorios) y batiente, (200 dormitorios). En todos los casos con carpintería de aluminio, vidrio sencillo de 4 mm de espesor, con capialzado y edificios sin terrazas.

Otro elemento de la fachada que produce una disminución en el aislamiento a ruido aéreo de la misma es la existencia de persianas. Las persianas enrollables de cajón y cinta, debido a la forma habitual de colocar el cajón de persiana hacia el interior, con una tapa de registro ligera y generalmente con poca estanqueidad disminuyen de forma importante el aislamiento a ruido aéreo de las fachadas. Las ventanas comercializadas que incluyen el cajón de persiana deberian dar informes de mediciones en laboratorio de

todo el sistema. Una forma de mejorar el aislamiento acústico a ruido aéreo consiste en revestir el interior del cajón de persiana con material absorbente acústico, reforzar la tapa del cajón y mejorar su estanquidad.

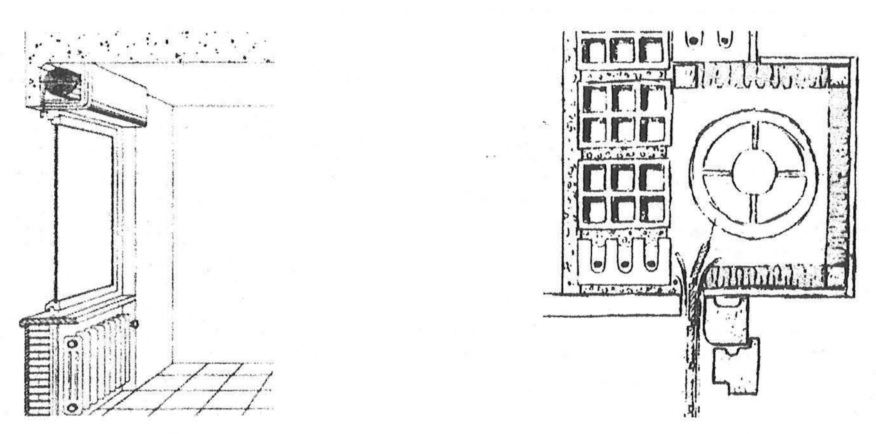


Figura 13.20: Vista de los elementos de menor aislamiento a ruido aéreo en una fachada

Al realizar el cálculo teórico del aislamiento a ruido aéreo de una fachada hay que considerar el cajón de persiana cuando existe.

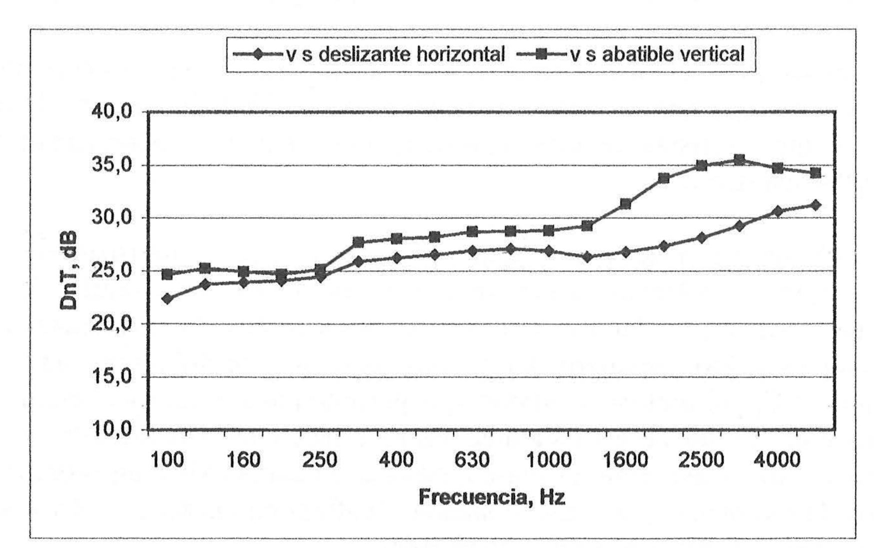


Figura 13.21: Comparación de la diferencia de niveles estandarizada $D_{ls,2m,nT}$ de las fachadas de dormitorios con ventanas deslizantes y batientes.

Existen muchas viviendas en nuestras ciudades próximas a fuentes acústicas muy ruidosas, por ejemplo grandes vías de circulación, con niveles sonoros continuos equivalentes en fachadas en periodo diurno y parte del nocturno que superan los 70 dB. En estas viviendas es necesaria la colocación de ventanas dobles, con una cámara lo mayor posible y de al menos 50 mm de distancia entre hojas.

La mayoría de los códigos técnicos o reglamentaciones de la edificación en paises de nuestro entorno tiene unas exigencias de aislamiento a ruido aéreo de las fachadas de los recintos de acuerdo con los niveles de presión acústica que inciden sobre ellas. El proyectista debe tener en cuenta, que en un mismo edificio deben tratarse de forma diferenciada las fachadas, según su orientación a las fuentes de ruido.

13.18 – AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO DE LAS PUERTAS

El aislamiento acústico a ruido aéreo que proporciona una puerta depende del tipo de materiales usados en su construcción y de manera muy importante de la estanquidad de las juntas entre el cerco y la puerta. Es necesario que los rebajes sean lo suficientemente anchos y que la puerta esté bien ajustada para que se apoye bien sobre el cerco. Si el ajuste no es correcto, el añadido de juntas elásticas no es suficiente para la mejora del aislamiento.

Las puertas simples habituales tienen una rendija en la parte inferior y cuanto mayor es esta menor es el aislamiento acústico. Una forma de corregir este problema es mediante un umbral recrecido o bien mediante un cierre inferior automático móvil que aprieta contra el umbral cuando la puerta se cierra.

En una puerta normal el aumentar el peso de la puerta no incrementa de forma apreciable el aislamiento al ruido aéreo si no se mejora su estanqueidad.

La figura 13.22 muestra el índice de aislamiento acústico a ruido aéreo de una puerta de madera maciza en diversas situaciones: sin juntas elásticas, con juntas elásticas y con sellado magnético.

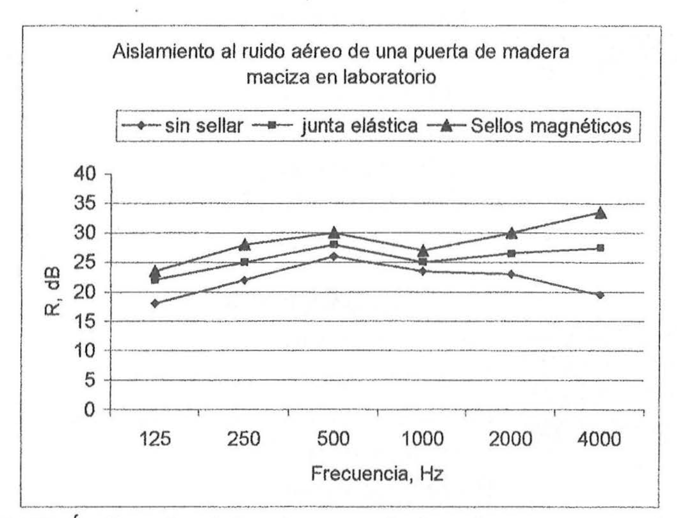


Figura 13.22: Índice de aislamiento acústico de una puerta de madera maciza en diferentes situaciones.

Es habitual que al realizar el montaje del precerco de la puerta queden grietas, por mala ejecución o por contracción del material, entre este y la pared, o bien holguras entre el cerco y el precerco, que muchas veces se ajustan con cuñas de madera. Se suelen ocultar estos fallos con la colocación de un tapajuntas, que en la mayoría de los casos no es suficiente para mejorar el aislamiento acústico.

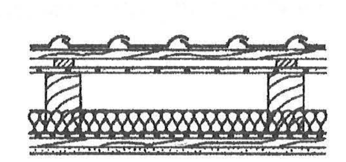
Se fabrican puertas de madera para mejorar el aislamiento acústico a base de dos hojas unidas por un mínimo de puntos de sujeción, con bastidor de madera o de acero. Se colocan juntas elásticas en todo el perímetro. Cuando se requiere mayor aislamiento acústico se recurre a puertas de acero con bastidor de este mismo metal y juntas elásticas de caucho en todo su contorno. Como estas puertas no suelen deformarse, se consigue mediante cierres a presión, un sistema duradero y sólido.

Si es necesario un aislamiento al ruido aéreo superior a 45 dB(A), hay que recurrir necesariamente a la esclusa acústica. Se llama así a un recinto al que se abren dos puertas. Si el interior del recinto se reviste de material absorbente sonoro, se consigue un elevado aislamiento al ruido aéreo sin tener que colocar puertas acústicas de elevadas exigencias de aislamiento.

13.19 – AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO DE LAS CUBIERTAS

Las cubiertas tiene como misión proteger las construcciones de los agentes atmosféricos. Se considera cubierta al conjunto de techo, forjado y cubrición propiamente dicha. A continuación se muestran los resultados de mediciones en laboratorio del índice ponderado de reducción acústica de diversas soluciones constructivas. El aislamiento acústico a ruido aéreo de divisorios horizontales se estudiará en la lección de aislamiento acústico a ruidos de impacto.

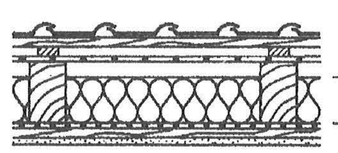
13.19.1 - CUBIERTAS INCLINADAS LIGERAS



COMPOSICIÓN

Teja de cemento
Latas de madera + contralatas
Lámina de protección frente a las condensaciones
Fibra de vidrio 60 mm
Barrera de vapor
Latas de madera
Yeso laminado 13 mm

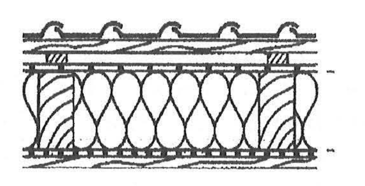
$R_W = 48$ dB



COMPOSICIÓN

Teja de cemento
Latas de madera + contralatas
Lámina de protección frente a las condensaciones
Fibra de vidrio 120 mm
Barrera de vapor
Latas de madera
Yeso laminado 13 mm

$R_W = 50$ dB



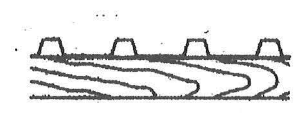
COMPOSICIÓN

Teja de cemento
Latas de madera + contralatas
Lámina de protección frente a las condensaciones
Fibra de vidrio 160 mm
Barrera de vapor
Latas de madera
Yeso laminado 13 mm

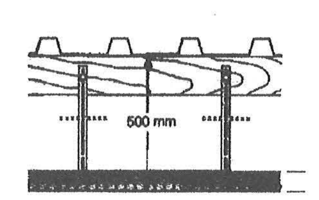
$R_W = 52$ dB

13.19.2 - CUBIERTAS DE CHAPA PERFILADA

Se emplean sobre todo en las construcciones industriales, ya que al tener un peso propio reducido, la estructura de apoyo puede ser relativamente ligera. A continuación se muestra la composición de algunas de ellas y su índice ponderado de reducción acústica.

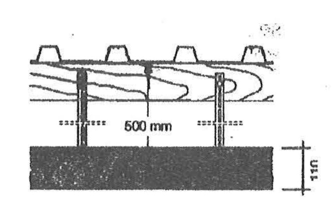


COMPOSICIÓN
Perfil trapezoidal de acero 40/183-1.00
R_W = 26 dB



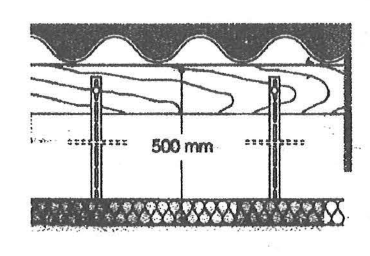
COMPOSICIÓN
Perfil trapezoidal de acero 40/183-1.00
Fibra de vidrio 50 mm, cámara 500 mm

R_w = 40 dB



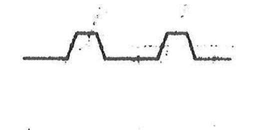
COMPOSICIÓN
Perfil trapezoidal de acero 40/183-1.00
Fibra de vidrio 110 mm, cámara 500 mm

R_w = 44 dB



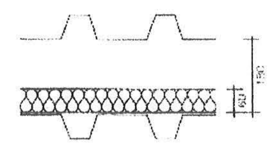
COMPOSICIÓN
Fibrocemento
Fibra de vidrio 110 mm, cámara 500 mm.
R_w = 43 dB

(Con la misma cámara y fibra de vidrio de 50 mm, R_W = 37 dB)



COMPOSICIÓN

Doble chapa trapezoidal de acero, e = 1 mm
cámara 180 mm
R_W = 42 dB



COMPOSICIÓN

Doble chapa trapezoidal de acero, e = 1 mm
cámara 180 mm
Lana mineral 60 mm
R_W = 47 dB

13.20.- EJEMPLOS DE AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO DE ALGUNAS SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS HABITUALES EN ESPAÑA

TABIQUES DE LADRILLO CERÁMICO

Nº	CROQUIS	AISLAMIENTO ACÚSTICO dB(A)	Peso (Kg/M²)
1	LADRILLO HUECO SENCILLO	32	69
2	LADRILLO HUECO DOBLE	35	104
3	1/2 PIE LADRILLO PERFORADO	46	250
4	1 PIE LADRILLO MACIZO	58	532

TABIQUES DE PLACAS DE YESO LAMINADO

Nº	CROQUIS (COTAS EN MM.)	AISLAMIENTO ACÚSTICO EN dB(A)		PESO (KG/M²)
		SIN LANA MINERAL	CON LANA MINERAL	
1		35	40	26
2		37	40	28
3		36	42	29
4		–	43	30
5		44	48	46
6		–	48	47
7		47	55	48
8		–	63	51

SOLUCIONES DE TRASDOSADO

DETALLE CONSTRUCTIVO	SIN AISLAMIENTO		CON AISLAMIENTO		
	Peso (kg/m²)	Aislamiento acústico dB (A)		Peso (kg/m²)	Aislamiento acústico dB (A)
LADRILLO HUECO SENCILLO	70	32	Lana mineral (30 mm) + cartón yeso (10 mm)	73	49
LADRILLO HUECO SENCILLO	70	32	Lana mineral (40 mm) + cartón yeso (10 mm)	74	51,5
LADRILLO HUECO DOBLE	150	38	Lana mineral (30 mm) + cartón yeso (10 mm)	153	49
LADRILLO HUECO DOBLE	150	38	Lana mineral (40 mm)+ cartón yeso (10 mm)	154	50
LADRILLO SENCILLO ENLUCIDO	70	27,7	Fieltro fibra natural y sintética (16 mm)+ caucho sintético especial (1,7 mm)	73,5	36,8
LADRILLO SENCILLO ENLUCIDO	70	27,7	Fieltro fibra natural y sintética (16 mm)+ caucho sintético especial (2,2 mm)	75	42
LADRILLO HUECO DOBLE	114	38	Lana mineral moldeada en forma de grecas (50 mm) + cartón yeso (15 mm)	130	49
LADRILLO HUECO DOBLE	114	38	Doble capa de lana mineral moldeada en forma de grecas (50 mm) + cartón yeso (15 mm)	133	55

BIBLIOGRAFÍA

[1] BERANEK, L., Noise and Vibration Control Engineering. Principles and Applications, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992.

[2] CREMER;MÜLLER. Principles and Applications of Room Acoustics. Vol. I, II, Applied Science Publishers. London, 1982.

[3] CREMER; HECKL, UNGAR. Structure Borne Sound. Springer Verlag, Berlín, 1988

[4] FAHY,F. Sound and Structural Vibration, Academic Press, London, 1994

[5] FAHY, F., Foundations of Engineering Acoustics. Academic Press, San Diego, 2001.

[6] HARRIS, C., Acoustical Measurements and Noise Control, Mc Graw Hill, New York, 1991. Existe una versión en español.

[7] UNE-EN ISO 717-1: 1996. Acústica.Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo.

[8] UNE-EN ISO 140-3:-Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3: Medición en laboratorio del aislamiento acústico a ruido aéreo de los elementos de construcción.

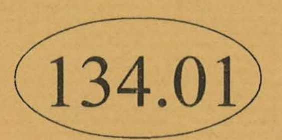
[9] UNE-EN ISO 140-4:- Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 4: Medición *in situ* del aislamiento a ruido aéreo entre locales.

[10] UNE-EN ISO 140-5: Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte5: Mediciónes in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachada y de fachadas

[11] UNE-EN 12354-1:2000. Acústica en la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 1: Aislamiento acústico del ruido aéreo entre recintos.

[12] Sharp B.H "A Study of Techniques to Increase the Sound Insulation of Building Elements". NTIS PB 222829/4, U.S. Department of Housing and Urban Development, Washington DC; "Prediction Methods for the Sound Transmission of Buildings Elements", Noise Control Eng., 11(2), 53-63, 1978.

CUADERNO



CATÁLOGO Y PEDIDOS EN
http://www.aq.upm.es/of/jherrera
mairea@ctv.es

